

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechanické technologie

Hodnocení vybraných vlastností žárových nástřiků  
HVOF na bázi Co

Evaluation of Selected Characteristics of HVOF  
Thermal Spraying Co Coating

Student:  
Vedoucí bakalářské práce:

Horák Přemysl  
Ing. Ochodek Vladislav

Ostrava 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechanické technologie

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Přemysl Horák**

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Hodnocení vybraných vlastností žárových nástřiků HVOF na bázi Co  
Evaluation of Selected Characteristics of HVOF Thermal Sprayed Co  
Coating

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te studii technologii žárových nástřiků se zaměřením na HVOF.
2. Proved'te rozbor používaných přídavných materiálů a jejich vlastnosti pro vysokorychlostní nástřik plamenem se zaměřením na materiály typu Stellite.
3. Navrhněte a realizujte experimentální program ověření užitečných vlastností HVOF nástřiků.
4. Dosažené výsledky porovnejte s literárními prameny a proved'te diskusi.

Seznam doporučené odborné literatury:

ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.


ASM. *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM 2004.

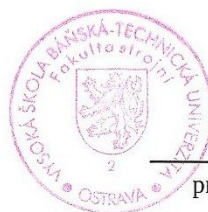
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

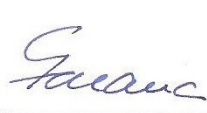
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.  
vedoucí katedry



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 15. 5. 2012



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.



V Ostravě: 15. 5. 2012

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Přemysl Horák

Adresa trvalého pobytu autora práce: Mánesova 474, Frýdek- Místek



## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

HORÁK, P. *Hodnocení vybraných vlastností žárových nástřiků HVOF na bázi Co: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2012, 39 s. Vedoucí práce: Ochodek, V.

Cílem bakalářské práce je hodnocení vybraných vlastností žárových nástřiků HVOF na bázi Co. V teoretické části je popsán princip technologie žárových nástřiků, rozdělení podle normy ČSN EN 657 038700. Převážná část teorie se věnuje nástřiku metodou HVOF a přídavným práškům na bázi Co (Stellite 6 a Stellite 21). V experimentální části je navrhnutý experiment pro ověření užitečných vlastností žárových nástřiků HVOF na bázi Co. Naměřené hodnoty jsou porovnány s dostupnou literaturou a je provedena diskuse dosažených výsledků.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

HORÁK, P. *Evaluation of Selected Characteristics of HVOF Thermal Spraying Co Coating: Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2012, 39 p. Thesis head: Ochodek, V.

The aim of my bachelor thesis is the evaluation of the selected characteristics of HVOF thermal spraying Co Coating. In the theoretical part there is described the principle of technology thermal sprayings and divided into norms ČSN EN 657 038700. The main part of the theory is focused on HVOF thermal spraying and added powder Co Coating (Stellite 6 and Stellite 21). In the experimental part there is suggested an experiment for checking used characteristics of HVOF thermal spraying Co Coating. The obtained values are compared with available literature and there is done the discussion about gained results.

<b>Seznam použitých značek a symbolů .....</b>	<b>8</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Žárové nástřiky .....</b>	<b>11</b>
<i>1.1 Princip technologie .....</i>	<i>11</i>
<b>2 Rozdělení žárových nástřiku podle normy ČSN EN 657 038700 [10].....</b>	<b>12</b>
<i>2.1 Podle typu přídavného materiálu.....</i>	<i>12</i>
<i>2.2 Podle charakteru operace .....</i>	<i>12</i>
<i>2.3 Podle nositele energie .....</i>	<i>13</i>
<b>3 Používané technologie žárového stříkání.....</b>	<b>14</b>
<i>3.1 Nástřik plamenem.....</i>	<i>14</i>
<i>3.2 Detonační nástřik.....</i>	<i>14</i>
<i>3.3 Plazmatický nástřik.....</i>	<i>14</i>
<i>3.4 Nástřik elektrickým obloukem .....</i>	<i>14</i>
<i>3.5 Srovnání jednotlivých metod .....</i>	<i>15</i>
<i>3.6 Vývoj žárových nástřiků .....</i>	<i>16</i>
<b>4 Metoda vysokorychlostní nástřik plamenem HVOF .....</b>	<b>17</b>
<i>4.1 Princip metody HVOF.....</i>	<i>17</i>
<i>4.2 Oblasti aplikace .....</i>	<i>19</i>
<i>4.3 Ochrana proti opotřebení hliníkových komponentů vystavených dynamickému zatížení</i>	<i>19</i>
<i>4.4 Snížení nákladů použitím velmi jemných nanášených prášků.....</i>	<i>20</i>
<b>5 Přídavné materiály typu Stellite na bázi kobaltu .....</b>	<b>22</b>
<i>5.1 Stellite 6.....</i>	<i>22</i>
5.1.1 Mechanické vlastnosti .....	24

5.2	<i>Odolnost Stellite 6 proti horké korozi jako ochrana kotlových trubek v prostředí uhelných kotlů</i>	25
5.3	<i>Stellite 21</i>	27
5.3.1	Mechanické vlastnosti	28
<b>6</b>	<b>Experimentální část práce</b>	<b>30</b>
6.1	<i>Návrh experimentu pro ověření užitečných vlastností</i>	30
6.2	<i>Zkušební vzorky</i>	31
6.3	<i>Příprava vzorků</i>	33
6.4	<i>Vyhodnocení mikrostruktury</i>	35
6.5	<i>Měření tloušťky nástřiku</i>	41
6.6	<i>Měření tvrdosti</i>	43
6.7	<i>Diskuse dosažených výsledků</i>	45
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>46</b>
<b>8</b>	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>Seznam příloh</b>	<b>53</b>

## Seznam použitých značek a symbolů

Značka	název	jednotka
HVOF	high velocity oxygen fuel	[-]
t	teplota ve stupních Celsia	[°C]
T	teplota v Kelvinech	[K]
p	tloušťka nanášeného nástřiku	[ $\mu\text{m}$ , mm]
Rz	drsnost	[ $\mu\text{m}$ ]
WC	karbid wolframu	[-]
w	hmotnostní procenta	[hm%]
Co	kobalt	[-]
$\dot{m}$	hmotnostní tok	[kg/h]
v	rychlost	[m/s]
A	adheze	[MPa]
S	obsah	[%]
p	pórovitost	[%]
L	hlučnost	[dB]
W <sub>2</sub> C	karbid wolframový	[-]
m	hmotnost	[kg, g]

## Úvod

V poslední době, kdy se hledají cesty ke snížení nákladů při výrobě, je aktuální otázka: Kde snížit náklady? Při výrobě strojních dílů, které potřebují v provozu specifické vlastnosti na povrchu, se naskytuje několik možností úprav povrchu vyráběného strojního dílu. Jedna z možností je vytvoření povlaku technologií žárovým nástřikem. Při použití technologie se sníží náklady na základním materiálu. K vytvoření povlaku se navrhne takový přídavný materiál, který bude nejlépe vyhovovat požadovaným vlastnostem.

Nespornou výhodou žárových nástřiků je možnost aplikace jak v průběhu nové výroby, tak i při renovaci (opravě, repasi) starých a opotřeбенých součástí. Žárové nástřiky rozšiřují možnosti povrchových úprav a nacházejí s rostoucím vývojem nové možnosti aplikace. Oproti navařování umožňují nanášení povlaků na členité povrchy. Při stříkání nedochází k tepelnému ovlivnění základního materiálu, protože během procesu se ohřeje základní materiál na teplotu kolem 150 °C. Povrch po nástřiku dosahuje vyšší kvality v porovnání s galvanickým pokovením. Například při galvanickém chromování v nanesené vrstvě chromu se vyskytují trhlinky a povlak z důvodu malé přilnavosti se po čase sloupne. V případě nanesení chromu žárovým stříkáním se ve výsledném povlaku neobjevují trhlinky a oproti galvanickému chromování má povlak vyšší přilnavost a tudíž i životnost.

Povlaky vytvořené žárovým nástřikem umožňují optimalizaci vlastností požadované po součásti. Žárovým nástřikem se nanášejí jak kovové povlaky, tak i nekovové. Velikost nastříkané vrstvy u metody vysokorychlostního nástřiku plamenem, dále jen HVOF (high velocity oxygen fuel), se pohybuje od několika mikronů až po několik milimetrů. Při renovacích se může nastříkat i povlak o tloušťce až 5,5 mm, ale musí být splněna podmínka, že přídavný materiál musí mít shodné nebo podobné fyzikální vlastnosti [40]. Technologii HVOF se nanášejí čisté kovy, slitiny kovů a cermenty.

Žárové nástřiky nachází široké uplatnění v řadě odvětvích průmyslu. Například v automobilovém, leteckém, sklářském průmyslu, v medicíně, energetice, při renovaci součástí atd.

Úkolem teoretické části bakalářské práce je provést rozbor žárových nástřiků se zaměřením na metodu HVOF, uvést rozdělení podle normy ČSN EN 657 038700, popsat nejpoužívanější metody a provést studii přídavných prášků na bázi kobaltu. Zásadním rozdílem jednotlivých metod žárového nástřiku je rozdílná teplota plamene a rychlost natavených částic. V případě metody HVOF se teplota plamene pohybuje kolem 2 600 °C

a rychlost částic dosahuje až 1 000 m/s. Studie přídavných prášků na bázi kobaltu se zaměří na prášky typu Stellite, především na prášky Stellite 6 a Stellite 21, protože tyto dva prášky budou předmětem zkoumání v experimentální práci.

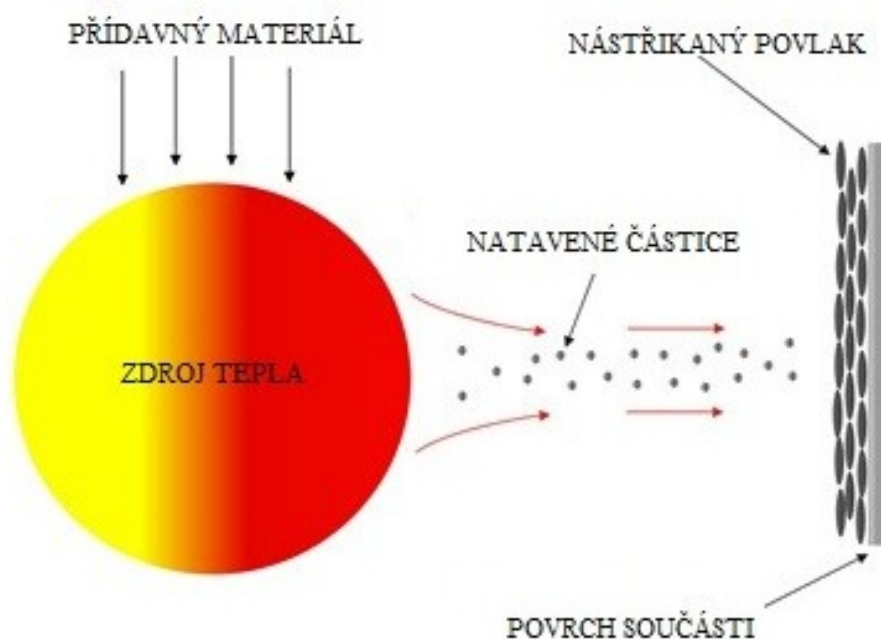
Cílem experimentální části bakalářské práce je navrhnout experiment pro ověření užitných vlastností přídavných prášků Stellite 6 a Stellite 21. Jednotlivé přídavné prášky budou nastříkané metodou HVOF na různé základní materiály. Především se bude měřit makro a mikro tvrdost, hodnotit se mikrostruktura a měřit tloušťka nástřiku. V závěru bakalářské práce se dosažené výsledky experimentu porovnájí s údaji od výrobce, s dostupnými literárními prameny a provede se diskuse dosažených výsledků.

# 1 Žárové nástřiky

Žárové nástřiky se začaly používat na začátku 20. století. Nejprve se používaly pro nástřik zinkové antikoroze ochrany povrchů. Postupem času se technologie vyvíjela a zdokonalovala. Během vývoje vznikaly nové metody nanášení žárových nástřiků a technologie nacházela širší uplatnění jak ve výrobním průmyslu tak i při renovaci opotřebovaných strojních dílů [1].

## 1.1 Princip technologie

Technologie žárových nástřiků patří mezi částicové procesy, kterým se nanáší kovové i nekovové povlaky o tloušťce větší než 50  $\mu\text{m}$ . Přídavný nanášený materiál může být ve formě prášku nebo drátu. Přídavný materiál vstupuje do zařízení, ve kterém dojde k natavení a urychlení částic směrem ke stříkanému povrchu. Povrch před nástřikem musí být mechanicky a chemicky očištěn. Při dopadu natavených částic dojde k výraznému plošnému rozprostření a natavené částice rychle začnou tuhnout. Princip vytváření žárových nástřiků je znázorněn na obrázku (obr. 1.1). Výsledný vytvořený povlak má charakteristickou lamelární strukturu se specifickými vlastnostmi. Všechny metody žárových nástřiků jsou založené na stejném principu, pouze se mění teplota a rychlost natavených částic [2], [3].



Obr. 1.1 Princip vytvoření žárového nástřiku [8]

## **2 Rozdělení žárových nástřiku podle normy ČSN EN 657 038700 [10]**

### **2.1 Podle typu přídavného materiálu**

Podle typu přídavného materiálu rozdělujeme:

- žárové stříkání z drátů,
- žárové stříkání z tyčinek,
- žárové stříkání z kordů,
- žárové stříkání z prášku,
- žárové stříkání roztaveného kovu.

### **2.2 Podle charakteru operace**

- Ruční stříkání:
  - všechny operace charakteristické pro proces žárové stříkání jsou ruční.
- Mechanizovaný nástřik:
  - všechny operace charakteristické pro proces žárové stříkání jsou mechanizované.
- Automatický nástřik:
  - všechny operace charakteristické pro proces žárové stříkání jsou plně mechanizované včetně manipulace (nakládání a vykládání) a jsou začleněny do programovaného systému.



### 2.3 Podle nositele energie

Tab. 1 Rozdělení podle nositele energie

Nositel energie	Název technologie	značka
ŽS rozprašováním taveniny	Nástřík roztaveného kovu	MBS
ŽS s využitím plyných nebo kapalných paliv	Nástřík plamenem z drátu	WFS
	Vysokorychlostním plamenem z drátu	HVWFS
	Plamenem z prášků	PFS
	vysokorychlostní	HVOF
	Detonační nástřík	DGS
ŽS a využitím expanze vysoce stlačených plynů	Nástřík za studena	CGS
ŽS s využitím elektrického oblouku nebo výboje v plynech	Elektrickým obloukem	AS
	Elektrickým obloukem s ochranným plynem	SAS
	Plazmatický nástřík na vzduchu	APS
	Plazmatický nástřík s ochranným plynem	SPS
	Plazmatický nástřík v komoře ve vakuu	VPS
	Plazmatický nástřík v komoře při tlaku přesahující 1 bar	HPPS
	Plazmatický nástřík s kapalinovou stabilizací	LSPS
	Indukční plazmatický nástřík	ICPS
ŽS s využitím svazku světelných paprsků	Nástřík laserem	LS

### **3 Používané technologie žárového stříkání**

#### **3.1 Nástřik plamenem**

Nástřik plamenem patří mezi nejstarší technologii nanášení přídavného materiálu na povrch součásti. Nástřik se realizuje pomocí stlačeného vzduchu (kyslíku) spolu s palivem. Jako palivo se používá vodík, propylen, propan, acetylen. Přídavný materiál se zde používá buď ve formě prášku, nebo drátu. Přídavný materiál je přiveden do plamene, který vznikl hořením směsi stlačeného vzduchu (kyslíku) s palivem, začne se natavovat a je urychlen směrem k povlakovanému povrchu součásti. Tato metoda vytváří méně kvalitní povlaky, proto se nepoužívá tam, kde se potřebuje povlak s vyšší hustotou a přilnavostí [4].

#### **3.2 Detonační nástřik**

Tato technologie využívá tepelnou a kinetickou energii spalovacího procesu plynů. Do spalovací komory jsou přivedeny stlačované palivové plyny a současně vstupuje do spalovací komory přídavný materiál ve formě prášku. Tato směs je posléze zapálena diskontinuálně svíčkou. Po zapálení směsi svíčkou nastane exploze plynů, která ohřívá a zároveň urychluje pohyb částic přídavného prášku hrdlem hořáku směrem k povrchu součásti. Ve finální fázi procesu se spalovací komora propláchne dusíkem. Popsaný proces se frekvenčně cyklicky opakuje. Frekvence opakujícího procesu je více než 100 cyklů za minutu [5].

#### **3.3 Plazmatický nástřik**

V procesu plazmového nástřiku jsou nanášené materiály obvykle ve formě prášku nebo drátu. Přídavný materiál je přivedený do plazmového paprsku, který vychází z plazmového hořáku. Plazmový hořák se skládá z vodou chlazené wolframové katody a válcové měděné anody. Mezi anodou a katodou hoří elektrický oblouk v plazmovém plynu. Jako plazmový plyn se nejčastěji používá argon popřípadě jiné inertní plyny s několika procenty plynů zvyšující entalpii plazmatu. Plazmatický plyn se do hořáku pouští axiálně a při výstupu z hořáku má plazma teplotu až 20 000 K. Do rozehřáté plazmy se přivádí přídavný materiál až na konci hořáku. Touto technologií můžeme nanášet jak čisté kovy tak i těžko tavitelné materiály jako je keramika [6].

#### **3.4 Nástřik elektrickým obloukem**

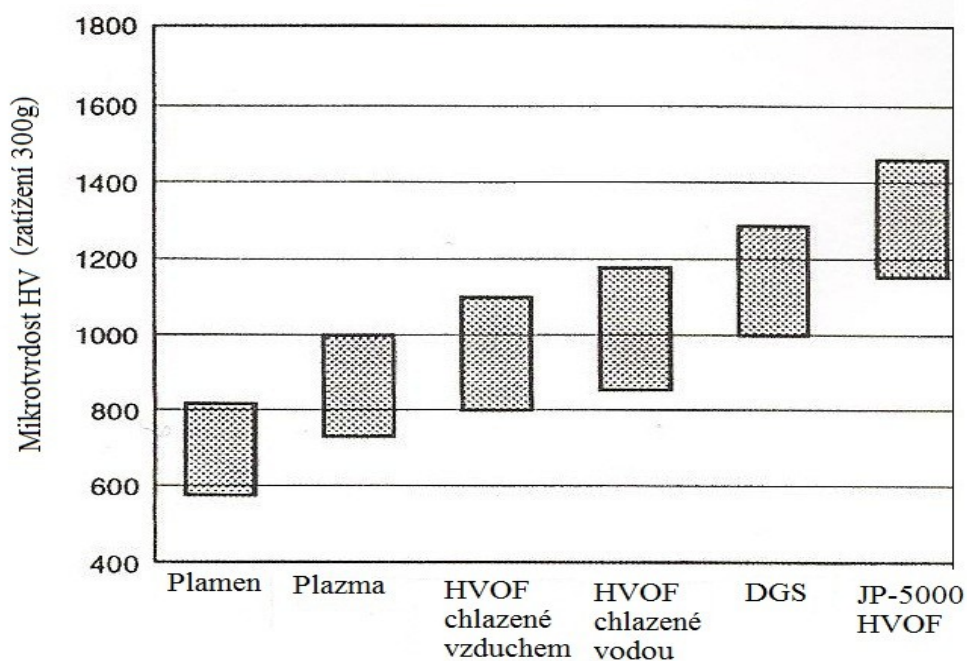
Přídavný materiál se zde používá ve formě dvou drátů, které se v nástřikové pistoli pomocí elektrického oblouku taví. Elektrický oblouk hoří na konci hořáku. Roztavený materiál je urychlovaný a rozprášený na povrch povlakované součásti pomocí proudu

vzduchu pod tlakem. Pro omezení oxidace nastříkaného povlaku může se použít jako rozprašovací plyn argon nebo dusík [7].

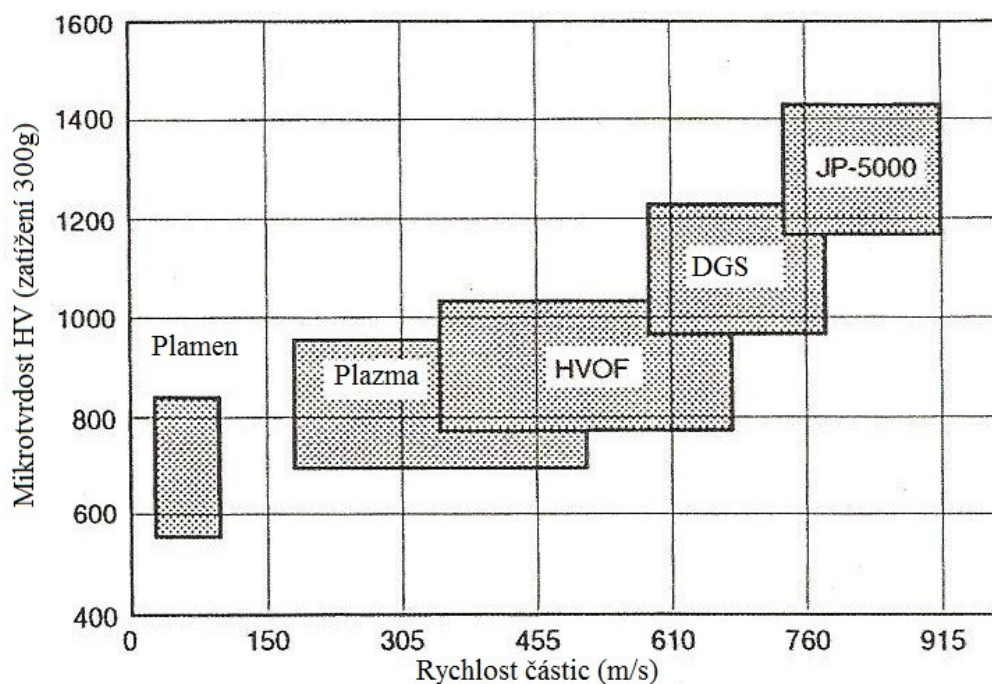
### 3.5 Srovnání jednotlivých metod

Tab. 2 Srovnání základních parametrů

	Rychlost částic	Adheze	Obsah oxidů	Pórovitost	Výkon nanášení	Typická tloušťka povlaku
	m/s	MPa	%	%	kg/hod	mm
Plamen	40	<8	10-15	10-15	1-10	0,2-10
Elektrickým obloukem	100	10-30	10-20	5-10	6-60	0,2-10
Plazma	200-300	20-70	1-3	5-10	1-5	0,2-2
HVOF	600-1 000	>70	1-2	1-2	1-5	0.2-2



Obr. 2.1 Srovnání tvrdosti povlaku WC-Co jednotlivých metod. JP 5 000 je registrovaný obchodní název společnosti Hobart Tafa Technologies [37]



Obr. 2.2 Srovnání rychlosti částic při stříkání povlaku WC-Co jednotlivých metod.

JP 5 000 je registrovaný obchodní název společnosti Hobart

TafaTechnologiest [37]

### 3.6 Vývoj žárových nástřiků

Mezi nejnovější technologii žárových nástřiků patří nástřik studeným plynem. V porovnání s ostatními metodami žárových nástřiků nedochází k natavení částic přídavného materiálu před dopadem a nehrozí, že by byl základní materiál tepelně ovlivněn. V plynovém hořáku jsou kovové částice urychleny až na nadzvukovou rychlost a dopadají v tuhém stavu na povrch základního materiálu. Pomocí vysoké kinetické energie jsou částice při dopadu deformovány a tím pádem vytvoří hustý povlak s dobrou přilnavostí. Nadzvukové rychlosti se dosahuje zahřátí nosného plynu až na několik set stupňů. Jako nosný plyn se převážně používá dusík. Částice prachu jsou vneseny do plynu tak, aby nedošlo k jejímu velkému ohřátí [9].

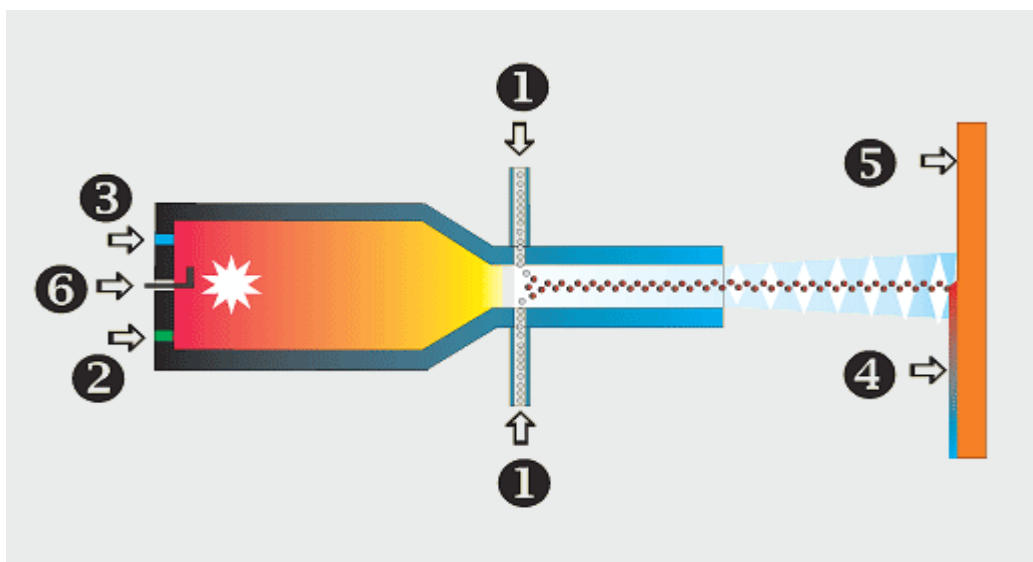
## **4 Metoda vysokorychlostní nástřik plamenem HVOF**

### **4.1 Princip metody HVOF**

Technologie byla vyvinuta v 80. letech minulého století, kdy pánové Browning a Wietfield použili k nástřiku kovového prášku raketový motor. Metoda HVOF byla vyvinuta s cílem používat extrémně vysoké rychlosti nástřiku. K dosažení vysoké rychlosti nástřiku je celá řada používaných hořáků s různě dlouhou tryskou. Mezi nejvíce používané hořáky patří hořák s vysokotlakým vodním chlazením spalovací komory HVOF s dlouhou tryskou. Stříkáci pistole se skládá ze 3 částí: mísicí zóna, zóny spalování a z trysky.

Zdrojem potřebné tepelné energie je směs paliva s kyslíkem. Nejčastěji se používá jako palivo kerosin, vodík, acetylen, propan a propylen. Palivo a kyslík se vhání do spalovací komory podle konstrukce hořáku axiálně nebo radiálně. V ní dojde k atomizaci palivové směsi a zažehnutí jiskrou zapalovací svíčky. Vzniklý plamen má teplotu 2 600 °C. Do plamene je přiváděn přídavný materiál ve formě prášku pomocí nosného plynu dusíku. Podle konstrukce hořáku vstupuje prášek axiálně pod vysokým tlakem nebo radiálně při nižším tlaku. Prášek se nataví v plamenu a jeho částice jsou urychlovány směrem k povlakovanému povrchu. Spaliny jsou urychlovány v trysce až na hodnotu přesahující rychlost zvuku. Vzniklý tlak ve spalovací komoře je neustále monitorován, aby byly dosaženy stabilní podmínky hoření plamene a reprodukovatelnost procesu.

V proudu spalin, které se šíří nadzvukovou rychlostí, probíhají termodynamické děje. Tyto děje vedou ke vzniku expanzních a kompresních vln, které se nazývají šokové diamanty. Šokové diamanty lze vidět v plamenu vycházející z hořáku. K chlazení hořáku se používá voda popřípadě vzduch. Chladicí médium proudí v meziplášti hořáku. Schéma nástřiku je na obrázku (obr. 3.1) [8], [11], [12], [13], [14].



Obr. 3.1 Nástřik metodou HVOF [12]

Legenda: 1. Přídavný materiál ve formě prášku

2. Přívod paliva

3. Přívod kyslíku

4. Nástřik

5. Podklad

6. Zapalovací svíčka

Při nástřiku natavených částic nanášeného prášku dosahují částice rychlosti až 1 000 m/s. Při takto vysoké rychlosti částic prášku při dopadu způsobí rovnoměrné rozprostření na povrch základního materiálu a zakotvení částic k povlakovanému povrchu součásti. Tím to se dosáhne jak vysoké hustoty, tak i vysoké adheze nanesených částic prášku. Kvůli nízké teplotě plamene není vhodná pro nástřik keramických povlaků. Mezi výhody použití této technologie patří, že výrazně omezuje oxidaci, fázové přeměny a vyhořívání některých prvků přídavného materiálu v průběhu nanášení povlaků. Zásadním rozdílem oproti ostatním metodám žárových nástřiků je, že vytváří povlaky v tlakovém pnutí. Tlakové pnutí v naneseném povlaku zvyšuje adhezi a je i vhodné z hlediska únavy povrchu povlakované součásti. Žárový nástřik metodou HVOF především slouží jako ochrana proti všem formám opotřebení jako je například koroze, otěr a eroze. Při nástřiku se dosahuje menší teploty než u nástřiku plazmou. Je vhodná pro kovové materiály, slitiny a je ideální pro karbidy. Naopak není vhodná pro keramiku, protože keramika má vysoký bod tání [39], [12], [17].

## **Základní parametry**

Tab. 3 Základní parametry [12]

Rychlost částic	Adheze	Obsah oxidů	Pórovitost	Výkon nanášení	Typická tloušťka nástříku
[m/s]	[MPa]	[%]	[%]	[kg/h]	[mm]
600-1 000	> 70	1 - 2	1 - 2	3 -6	0,2 – 2

### **Výhody:**

- vysoká hustota nástříku,
- vysoká soudružnost,
- nízká pórovitost a obsah oxidů,
- nízká teplota podkladů do 150 °C,
- tlakové napětí v nástřikové vrstvě,
- široký výběr prášků.

### **Nevýhody:**

- hlučnost až 130 dB,
- nelze nanášet keramické povlaky,
- omezení pro nástřik vnitřních ploch.

[12]

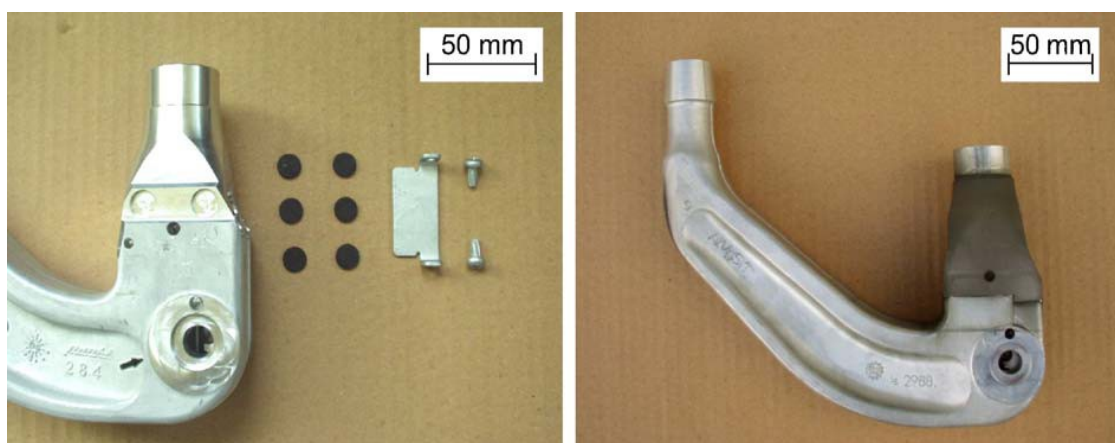
## **4.2 Oblasti aplikace**

Žárový nástřik metodu HVOF se používá v energetice, automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu, těžkém průmyslu a při renovaci opotřeбенých součástí [18].

## **4.3 Ochrana proti opotřebení hliníkových komponentů vystavených dynamickému zatížení**

Požadavky v současném automobilovém průmyslu jsou lehké konstrukce aut, protože auta při nižší hmotnosti vykazují menší spotřebu a vyprodukují méně výfukových plynů. Jako příklad úspory hmotností pomocí metody HVOF lze ukázat na táhlech používaných v autech. Táhla v autech jsou vystaveny dynamickému zatížení. Táhlo je z důvodu

hmotnosti vyrobené z hliníkové slitiny místo oceli. Zde je problém, že hliníkové slitiny nemají potřebnou odolnost proti opotřebení, proto se v místě dotyku musí chránit dalšími prvky. Jinak by táhlo neprošlo mechanickými testy. Ochranné prvky jsou přišroubované k táhlu. Konstrukce táhla je tím složitější a náročnější na výrobu a také se zvyšuje výrobní čas. Ochranné komponenty se musí po určité době vyměnit z důvodu opotřebení, což zvyšuje náklady na údržbu. Při nanesení ochranného povrchu metodou HVOF se konstrukce táhla výrazně zjednoduší a tím to se zkrátí výrobní čas. Povlaky nanesené metodou HVOF vykazují vyšší pevnost a odolnost proti opotřebení, takže odpadají náklady na údržbu. Ve finální podobě je táhlo i lehčí. [15].



Obr. 3.2 Na levém obrázku je táhlo s ochrannými komponenty a na pravém táhlo s HVOF nástřikem v místě dotyku [15].

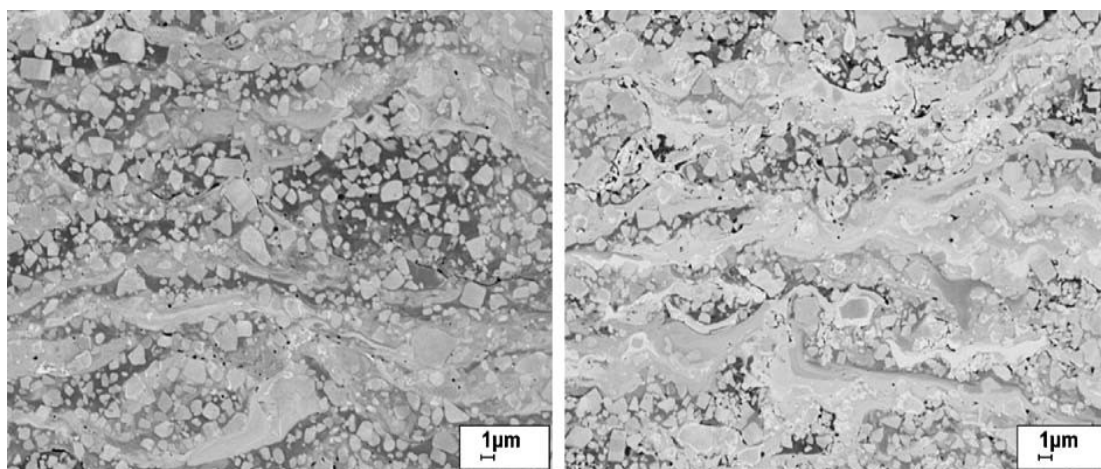
#### 4.4 Snížení nákladů použitím velmi jemných nanášených prášků

Povrchová úprava je klíčová fáze výroby, která se z ekonomického hlediska se podílí na konečné částce za daný výrobek. Vzhledem k tvrdosti nanášených povlaků metodou HVOF se ve většině případů pro povrchovou úpravu používají diamantové nástroje místo nástrojů z levnějších materiálů. Proto je vhodnější, aby drsnost povrchu po nástřiku byla co nejmenší. Jedna z možností jak snížit drsnost po nástřiku je stříkat prášek s malými částicemi. Hlavní nevýhoda použití velmi jemných prášků je špatné chování a komplikované podávání prášku do trysky, proto se prášek musí podávat ultrazvukovými podavači.

Prášky vyrobené z cermentů mají zrnitost menší než 10  $\mu\text{m}$ . Po nástřiku cermentového prášku se drsnost Rz pohybuje do 20  $\mu\text{m}$ . Vzhledem k malým rozměrům částic se musí



částice ohřívat s větší intenzitou než běžné používané prášky s velikostí částic od 15  $\mu\text{m}$  do 50  $\mu\text{m}$ . Z tohoto důvodu probíhají v procesu stříkání silnější metalurgické reakce. Kromě zrušení WC matrice v kobaltu je také oduhličování silnější pro použití velmi jemných prášků. Pomoci XRD analýzy bylo zjištěno, že povlak složený z WC a Co v poměru 83/17 měl rozměry částic prášku od 15  $\mu\text{m}$  do 30  $\mu\text{m}$  (obr. 3.3), přičemž výsledný povlak obsahoval 4 hm%  $\text{W}_2\text{C}$  a 2 hm% W. Při použití prášku s velikostí částic od 5  $\mu\text{m}$  do 15  $\mu\text{m}$  měl výsledný povlak 20hm%  $\text{W}_2\text{C}$  a 17hm % W. V případě použití velmi jemných prášků má výsledný povlak nižší mikrotvrdost. Při srovnání s prášky s většími částicemi taky vykazují vyšší zbytkové napětí v povlaku.



Obr. 3.3 Na levém obrázku je nanesený povlak z prášku WC/Co v poměru 83/17 s velikosti částic 15-30  $\mu\text{m}$  a na pravém je stejný povlak, ale s velikosti částic prášku 5-15  $\mu\text{m}$  [15].

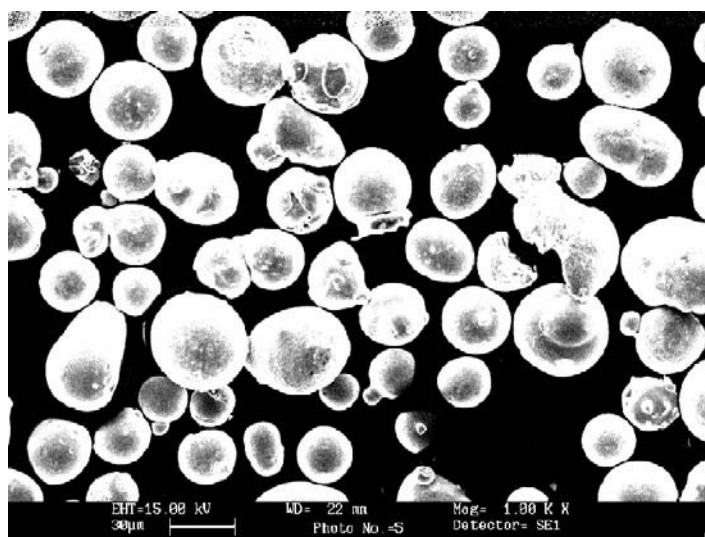
Nanesené povlaky z velmi jemných prášků vykazují vyšší odolnost proti otěru a proti korozi než nanesené povlaky z konvekčních prášků, proto se již úspěšně používají v hydraulických pístech jako ochranný nástřík. [15].

## 5 Přídavné materiály typu Stellite na bázi kobaltu

Jedna z firem, jenž se specializuje na výrobu a vývoj přídavných materiálů pro žárové nástřiky je firma Deloro Stellite. Tato firma má více jak stoletou tradici ve výrobě přídavných materiálů typu Stellite na bázi kobaltu. Nabízí pestrý výběr přídavných materiálů s různými vlastnostmi podle přání zákazníka. Ve své práci se zaměřím na Stellite 6 a na Stellite 21.

### 5.1 Stellite 6

Jedná se o přídavný materiál na bázi kobaltu, který se dodává ve formě drátu, tyčinek, prášku a elektrod. Své uplatnění nachází v širokém spektru výrobního a renovačního průmyslu. Ve formě prášku mají částice kulový tvar (obr. 4.1) a přibližnou velikost 45  $\mu\text{m}$ . Při nástřiku metodou HVOF má nanesený povlak pórovitost do 2 %. To je způsobené vysokou rychlostí nanášení materiálu a tudíž má povlak i vysokou hustotu [27].



Obr. 4.1 Mikrografický snímek prášku Stellite 6 [27]

Stellite 6 je nejpoužívanější slitina z řady slitin Co-Cr-WC. K jeho hlavní přednosti patří vynikající odolnost proti většině druhů opotřebení a odolává korozi v širokém rozsahu teplot. Dále udržuje přiměřenou tvrdost i při teplotách kolem 500 °C a odolává oxidaci při teplotě 1 095 °C. Struktura bohatá na kobalt je stabilní i při teplotách blížících se k bodu tání a to teplotě 1 495 °C. Stellite 6 má mřížku ploště středěnou (FCC). Mezi další charakteristické vlastnosti patří odolnost proti kavitační erozi. Výjimečnou odolnost proti opotřebení způsobuje charakteristická fáze tvrdého karbidu rozptýleného v CoCr slitině v matici. Chemické složení je uvedené v tabulce (tab. 4). Při použití Stellite 6 jako elektroda při svařování dochází ke zvýšení obsahu Fe v důsledku zředění se základním

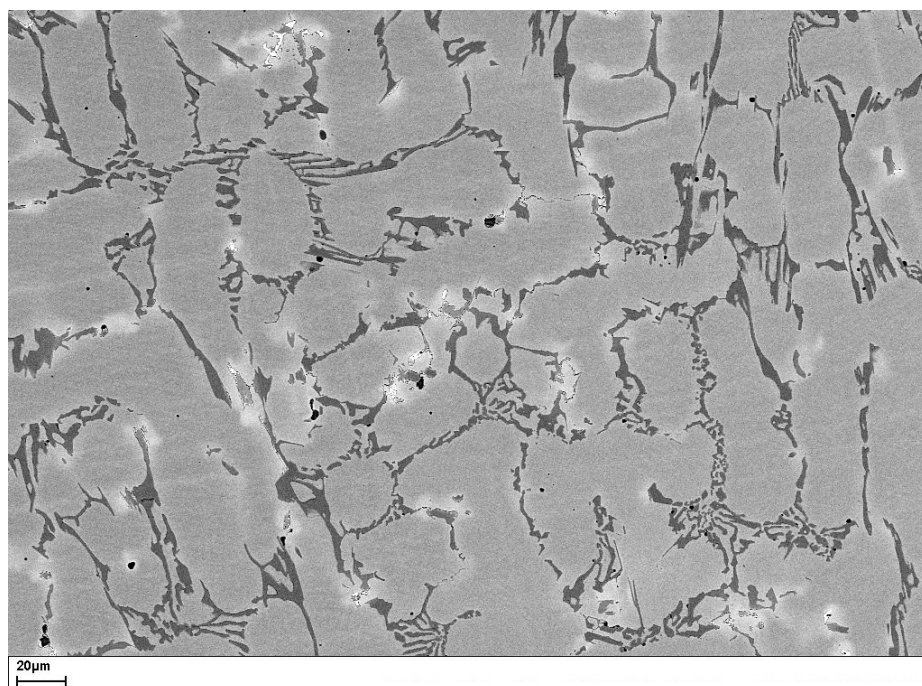
materiálem. Při nástřiku metodou HVOF se křemík ve výsledném povlaku šíří od povlaku k podkladu a je rovnoměrně rozmístěný. Nikl se objevuje především na hranicích zrn [20], [21], [23], [27].

Tab. 4 Chemické složení Stellite 6 [%hm] [22]

Cr	W	C	ostatní
27-32	4 - 6	0,9 – 1,4	Ni, Fe, Si Mn, Mo

Odolává teplotním šokům. Vyznačuje se nízkým koeficientem tření a jeho třecí koeficient je 0,12. Což je dobré z hlediska, pokud se Stellite 6 použije v místě dosedací plochy kov na kov, nemusí být na dosedací plochu aplikováno mazivo pro snížení tření. Má vysokou odolnost proti agresivitě různých složek. Odolává oxidaci kyselin především kyselině octové, mravenčí, fosforečné a nízké koncentraci kyseliny sírové. Nejčastěji se Stellite 6 používá na ventily, které chrání proti otěru. Další aplikace může být na lopatky turbín, kde lopatky chrání proti erozivnímu opotřebení.

Ve velké míře se používá na díly ventilů, čerpadel a na nože. Ideální aplikace je na výrobky, které se nacházejí v prostředí, jenž kombinuje brusné a erozivní opotřebení. Hlavní nevýhodou je, že se po aplikaci ve struktuře dochází k precipitaci křehkého karbidu do sítě. Během stárnutí může dojít ke vzniku sekundárního karbidu. Struktura výsledného povlaku zobrazena na (obr. 4.2). Změna mikrostruktury na různých podkladech může nastat vlivem malým šířením prvků z podkladu do povlaku [22], [27], [29].



Obr. 4.2 Struktura stellite 6 při zvětšení 1000krát [22]

### 5.1.1 Mechanické vlastnosti

Jednotlivé vlastnosti tvrdost, mez pevnosti, tažnost a pružnost se mění v závislosti na technologii a parametrech nástřiku.

Tab. 5 Mechanické vlastnosti Stellite 6 [22]

Mez pevnosti v tahu R <sub>m</sub>	Mez kluzu	Tažnost	Modul pružnosti
R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p 0,2</sub> [MPa]	A [%]	E [GPa]
850	700	< 1	209

## Tvrдость Stellite 6 podle Vickerse při jednotlivých teplotách

Tab. 6 Tvrдость Stellitu 6 [21]

Teplota °C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Tvrдость HV	410	390	356	345	334	301	235	155	138	95

Uvedená tvrдость je orientační, protože výsledná tvrдость naneseného povlaku závisí na technologii nástřiku a na podmínkách nástřiku. Při použití metody HVOF může výsledná tvrдость dosahovat až 900 HV. Ve výsledném nastříkaném povlaku může dojít k nerovnoměrné tvrđosti. Nerovnoměrnou tvrđost pravděpodobně způsobují mikrostrukturní změny v průřezu povlaku [27].

Největší úběr materiálu při erozivním opotřebení dochází, když pevné částice dopadají v úhlu 90° na povrch chráněného materiálu Stellitem 6. Na povrchu se vytvoří krátery způsobené plastickou deformací. Ale i tak Stellite 6 nevykazuje žádné makro a mikrotrhliny [25].

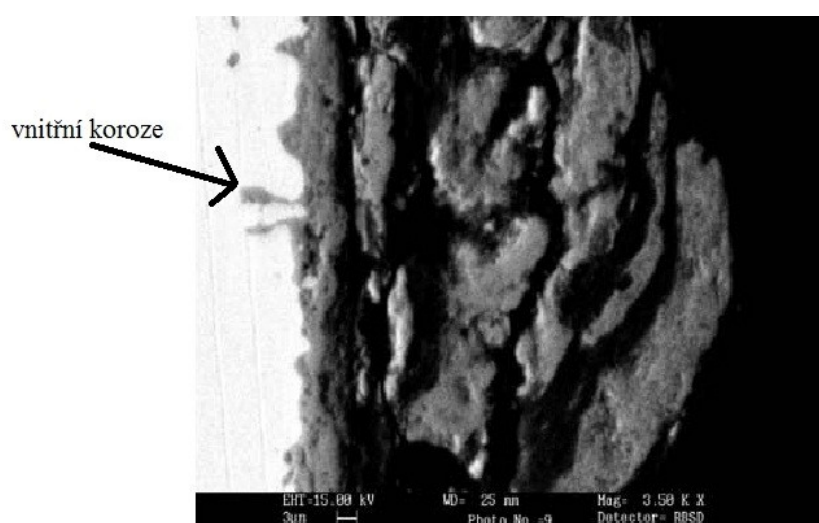
### 5.2 Odolnost Stellite 6 proti horké korozi jako ochrana kotlových trubek v prostředí uhelných kotlů

Jeden z vážných problémů u uhelných kotlů je horká koroze. Kotlové trubky jsou vystaveny dlouhodobě působením vysokých teplot. Z důvodu napadení korozi dochází u trubek ke ztenčení stěny trubky. Po čase začnou praskat a musí se vyměnit. Tudiž se zvyšují náklady na údržbu a provoz. Jedna z možností je kotlové trubky chránit ochranným povrchem. Jako ochranný povrch se může použít Stellite 6 nastříkaný metodou HVOF. Na kotlové trubky se používá slitina Superni 75. Chemické složení uvedeno v tabulce (Tab. 7) [24].

Tab. 7 Chemické složení Superni 75 [24]

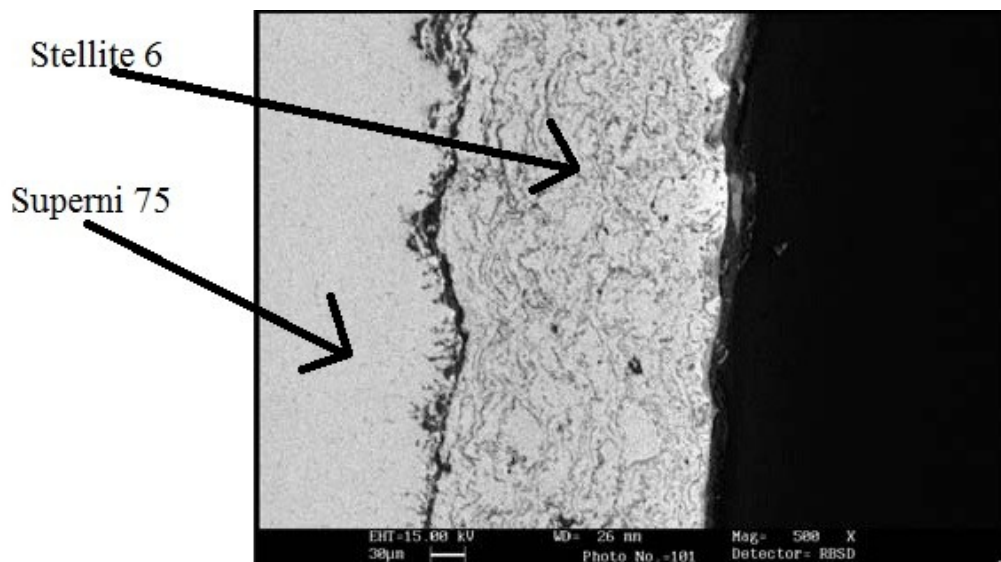
Cr [%]	Fe [%]	Ti [%]	C [%]
19,5	3	0,3	0,1

Kotlová trubka bez ochranné vrstvy na povrchu vystavená teplotě 900 °C vykazuje již po 100 hodinách příznaky štěpení povrchu a po 1 000 hodinách se již projeví vnitřní koroze, která zasahuje do hloubky 10 µm (obr. 4.3). Kromě vnitřní koroze se na povrchu tvoří trhlinky a dochází k rozrušování materiálu z důvodu napadení horké korozi [24].



Obr. 4.3 Průřez kotlové trubky bez ochranného nástřiku po 1000 hodin vystavené teplotě 900°C [24].

Při použití ochranné vrstvy Stellite 6 na kotlové trubky nedochází ani po 1 000 hodinách při teplotě 900 °C ke ztrátě přilnavosti k základnímu materiálu a neobjevují se trhliny. Nedochází ke vzniku horké vnitřní koroze (obr. 4.4). Vzniku koroze zabraňuje nízká pórovitost povlaku, která se pohybuje do 2 %. Dále na povrchu vznikají ochranné oxidy a to oxidy chromu a křemíku. Tyto oxidy ucpou póry a slouží jako ochranná bariéra před napadením korozi. Oxidy vznikají podél hranic zrn [24], [26], [27].



Obr. 4.4 Mikroskopický snímek řezem kotlové trubky s ochrannou vrstvou Stellite 6 po 1 000 hodin vystavené teplotě 900 °C [24]

Stellite 6 se vyrábí v modifikovaných verzích to ve verzi Stellite 6 B a Stellite 6 K. Stellite 6 B se doporučuje použít v extrémních podmínkách opotřebení, otěru a tepla. Má nízký koeficient tření. Vyniká vysokou odolností proti oxidaci, korozi a teplotnímu šoku [28].

Stellite 6 K má vyšší odolnost proti otěru ale nižší tažnost než Stellite 6 B. Vysoké teploty mají jen malý vliv na jeho tvrdost, houževnatost a rozměrovou stabilitu. Odolává korozi při nízkých a zvýšených teplotách [28].

### 5.3 Stellite 21

Dříve byl označován jako Stellite 8. Začal se vyrábět v roce 1930 jako antikorozní CoCr slitina. Našel uplatnění v medicíně, kde se používá na kyčelní implantáty. Patří mezi první slitiny, které odolávaly teplu a začaly se používat v proudových motorech. Skládá se z CoCrMo matice, která obsahuje rozptýlené tvrdé karbidy. Tyto karbidy mají za následek zvýšení tvrdosti, ale snižují tažnost. Velikost, tvar, typ a rozložení karbidů závisí na tepelném zpracování. Proto u Stellite 21 se mění mechanické vlastnosti podle technologie nanesení či výroby. Mezi jeho přednosti patří vynikající odolnost proti kavitaci, odolnost proti zadření v případě, když se po sobě pohybují 2 kovy.

Nehodí se do prostředí, kde by byl povlak vystavený otěru vlivem tvrdých částic. Vyznačuje se vynikající odolností proti mechanickému a teplotnímu šoku. Může být ve

formě prášku nebo v podobě elektrody na svařování. Je vhodný jej aplikovat do prostředí, kde se vyskytuje kavitace, koroze, eroze. Zvláště je doporučeno jej aplikovat na ventily používané v petrochemickém průmyslu a v elektrárnách. Základní složkou Stellite 21 je kobalt [19], [30].

Tab. 8 Chemické složení Stellite 21 [%hm] [30]

Cr	Mo	C	Ni	ostatní
26 – 29	4,5 – 6,0	0,20 – 0,35	2 - 3	Fe, Si, Mn

### 5.3.1 Mechanické vlastnosti

Jednotlivé mechanické vlastnosti jsou uvedené v tabulce 9 a 10. Jedná se o orientační hodnoty, protože závisí na technologii nástřiku a jeho parametřů. U metody HVOF tvrdost může být až dvojnásobně vyšší než uvádí výrobce Delloro Stellite.

Tab. 9 Tvrdost Stellite 21 podle Vickerse při jednotlivých teplotách [30]

Teplota °C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Tvrdost HV	347	279	248	228	208	197	181	153	123	92

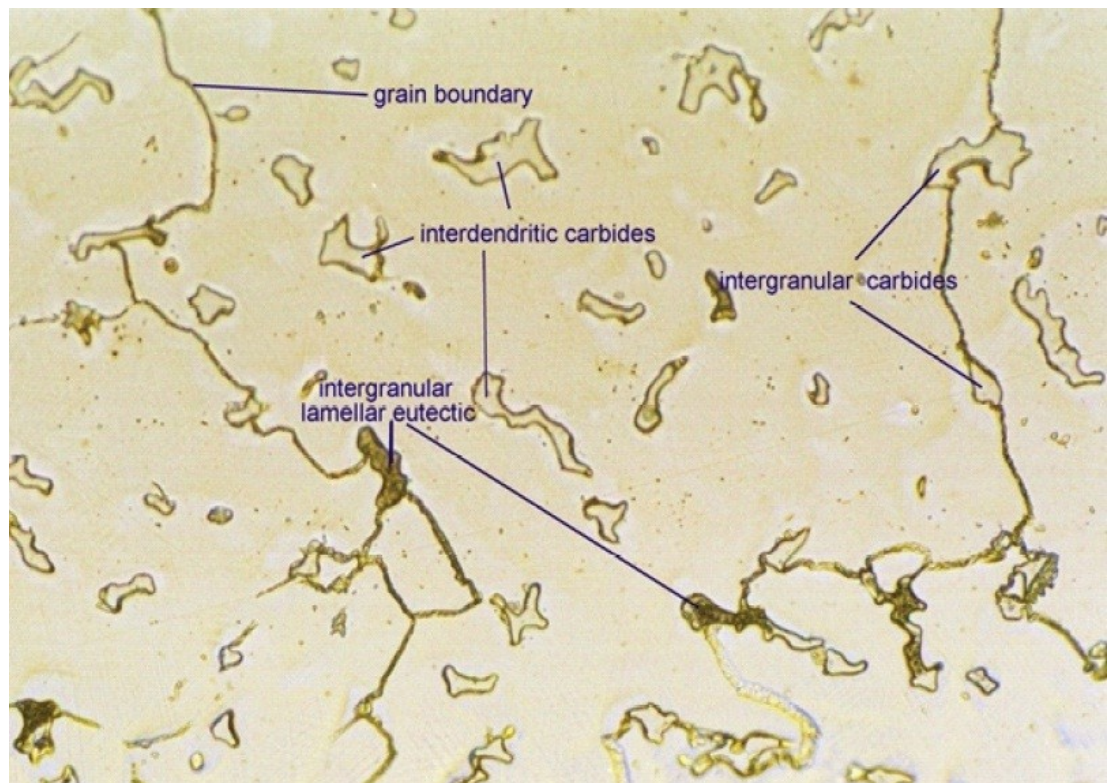
Tab. 10 Mechanické vlastnosti [30]

Mez pevnosti v tahu Rm	Mez kluzu	Tažnost	Modul pružnosti
Rm [MPa]	Rp 0,2 [MPa]	A [%]	E [GPa]
710	565	9	250

Přidáním yttria do stellite 21 se zvýší odolnost proti opotřebení v celém rozsahu teplot. Přidání yttria nepatrně sníží tvrdost stellite 21. Velikost opotřebení závisí na třecím koeficientu. Třecí koeficient Stellite 21 závisí na teplotě. Při pokojové teplotě má třecí



koeficient 0,23. Největší opotřebení dosahuje Stellite 21 při teplotě 200 °C, kdy třecí koeficient je 0,95. Nad 200°C se opotřebení zmenšuje, protože třecí koeficient s rostoucí teplotou nad 200 °C klesá [31], [32].



Obr. 4.5 Mikrostruktura Stellite 21 při zvětšení 200krát. [30]

Překlad: grain boundary – hranice zrn

intergranular lamellar eutectic- mezikrystalové lamelové eutektické

interdendritic carbides – mezidendritické karbidy

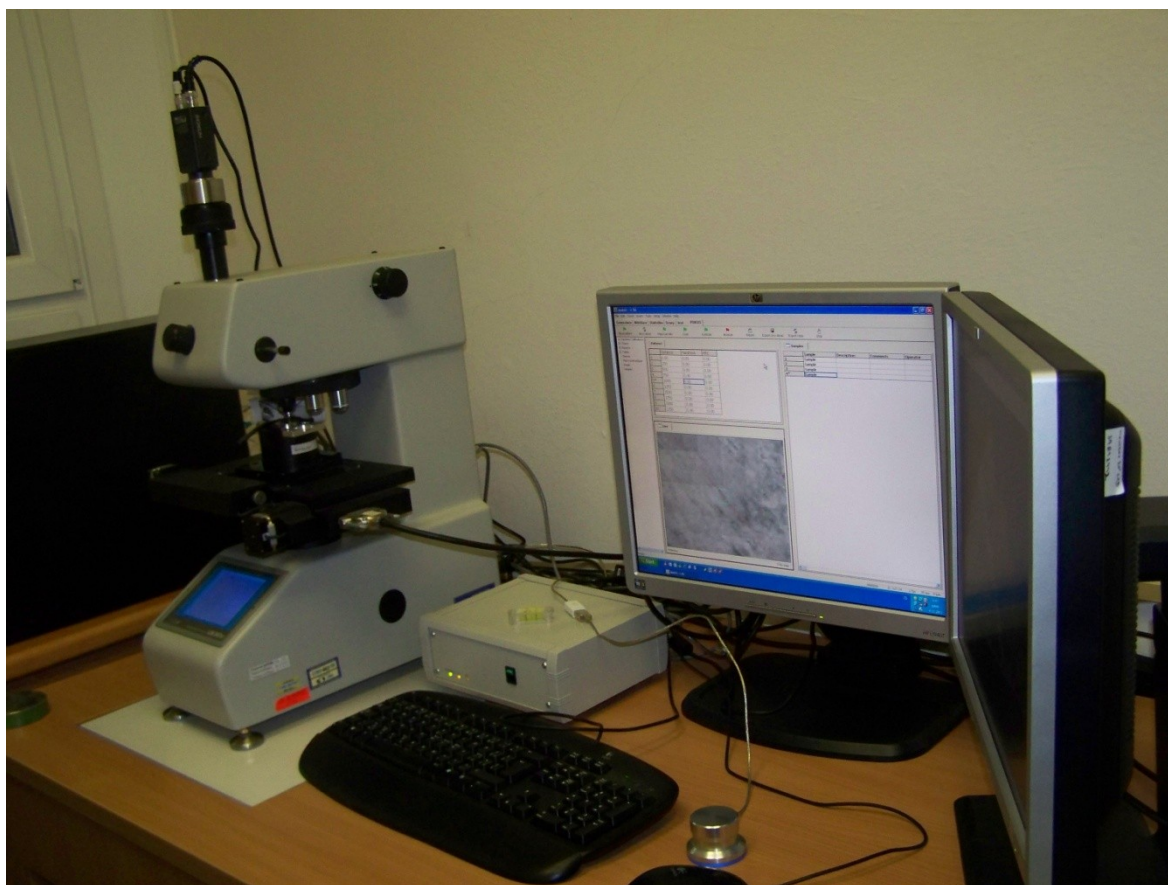
intergranular carbides - mezikrystalické karbidy

## 6 Experimentální část práce

Cílem experimentální práce bylo ověření užitečných vlastností žárového nástřiku provedeného metodou HVOF. Zkoumané materiály byly Stellite 6 a 21. Pro ověření základních vlastností bylo k dispozici celkem 6 vzorků s různými základními materiály. Bylo provedeno měření tloušťky nástřiku, mikro a makro tvrdosti a vyhodnocení mikrostruktury.

### 6.1 Návrh experimentu pro ověření užitečných vlastností

Vyhodnocení mikrostruktury se provedlo pomocí světelné mikroskopie s použitím Olympus GX51 za podpory programu QuickPhoto industrial 2.2. Při měření tloušťky bylo využito připravených vzorků pro vyhodnocení mikrostruktury a tloušťka se měřila v řezu za pomoci světelné mikroskopie s použitím Olympus GX51 za podpory programu QuickPhoto industrial 2.2. Mikrotvrdost se měřila podle Vickerse na přístroji Leco microhardness Tester CM 247 AT při podpoře programem Amb 43 – 1.50 (obr. 5.1). Měření makrotvrdosti probíhalo na Vickersově tvrdoměru.



Obr. 5.1 Přístroj na měření mikrotvrdosti Leco microhardness Tester CM 247 AT

## 6.2 Zkušební vzorky

Vzorky byly ve tvaru válce o rozměrech  $\phi 30 \times 50$  mm (obr. 5.2). Přídavné materiály byly nastříkané na válečky pomocí zařízení TAFA JP 5 000 podle [Příloha 3]. Na vzorky číslo 1, 2 a 3 byl nastříkaný Stellite 6. Základní materiál u vzorku číslo 1 byl S335J0 (11 523) a u vzorku číslo 2 a 3 byl X12CrMo9-1 (17 116). Na vzorky číslo 4, 5 a 6 byl nanesený Stellite 21. Základní materiál pro vzorek číslo 4 byl S335J0 (11 523), pro vzorek číslo 5 byl X 10CrNiTi 18-10 (17 246) a pro vzorek číslo 6 byl X8CrNi 25-21(17 255). Základní materiály byly před nástřikem otryskány. Po nástřiku následovalo broušení. Jednotlivá chemická složení materiálů jsou uvedené v tabulkách.



Obr. 5.2 Vzorky s nastříkaným Stellite 6

Tab. 11 Chemické složení Stellite 6 pro experiment [Příloha 1]

Prvek	Cr	C	Fe	Mn	Mo	Ni	Si	W
[%]	27,5	1,1	0,6	0,004	0,001	0,2	1,2	4,1

Tab. 12 Chemické složení Stellite 21 pro experiment [Příloha 2]

Prvek	Al	B	Cr	C	Fe	Mg	Mo	N
[%]	0,001	0,001	28,23	0,00291	0,2	0,001	5,8	0,01
Prvek	P	S	Si	Ti	W	Ni	O	
[%]	0,005	0,002	0,1	0,001	0,01	0,1	0,05	

Tab. 13 Chemické složení materiálu 11 523 [33]

Prvek	C	Mn	P	S	Si	N
[%]	0,2 max	1,6 max	0,04 max	0,04 max	0,55 max	0,009max

Tab. 14 Chemické složení materiálu 17 116 [34]

Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
[%]	0,15	0,30-0,60	0,25-1,00	0,030	0,030	8-10	0,9-1,1

Tab. 15 Chemické složení materiálu 17 255 [35]

Prvek	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S
[%]	0.2	24-26	19-22	<1.5	<1	0.045	0.03

Tab. 16 Chemické složení materiálu 17 246 [36]

Prvek	C	Ni	Ti	Mn	Si	P	S
[%]	0.12	8-11	Min5x(%C-0.03)	2	1	0.045	0.03



### 6.3 Příprava vzorků

Pro hodnocení a dokumentaci vlastností byly vzorky rozpůleny na řezačce Struers Discotom 6 (obr. 5.3). Tato řezačku umožňuje řezání při chlazení. Chlazení se používá, aby se minimalizovalo ovlivnění vzorků vlivem tepla.

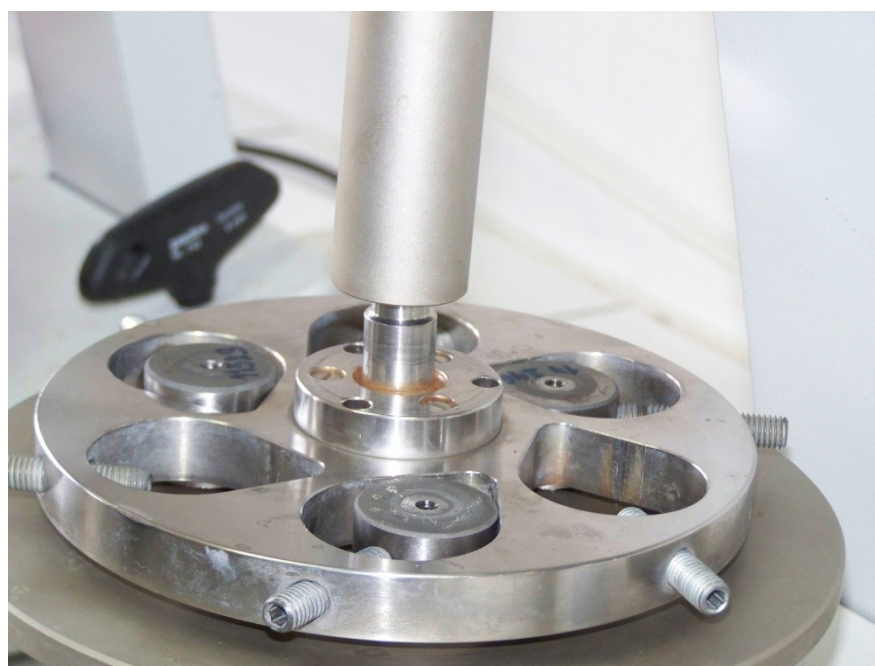


Obr. 5.3 Vzorek č. 5 v řezačce značky Struers Discotom 6

Po hrubém dělení následovalo broušení na brusce značky Struers tegra force 5 (obr. 5.4). Předtím než bylo možné brousit vzorky, musely se nejprve upnout do držáku (obr. 5.5). Při broušení se používaly brousicí kotouče se zrnitostí 80, 120, 320, 500, 800, 1 200, 2 400. Brousilo se na kotoučích od nejmenší zrnitosti až po největší. Po každé změně brusného papíru bylo nutné vzorky očistit od nečistot, které vznikly během broušení. Vzorky na každém brusném kotouči se brousily 2 minuty.



Obr. 5.4 Broušení vzorků na brusce Struers tegra force 5



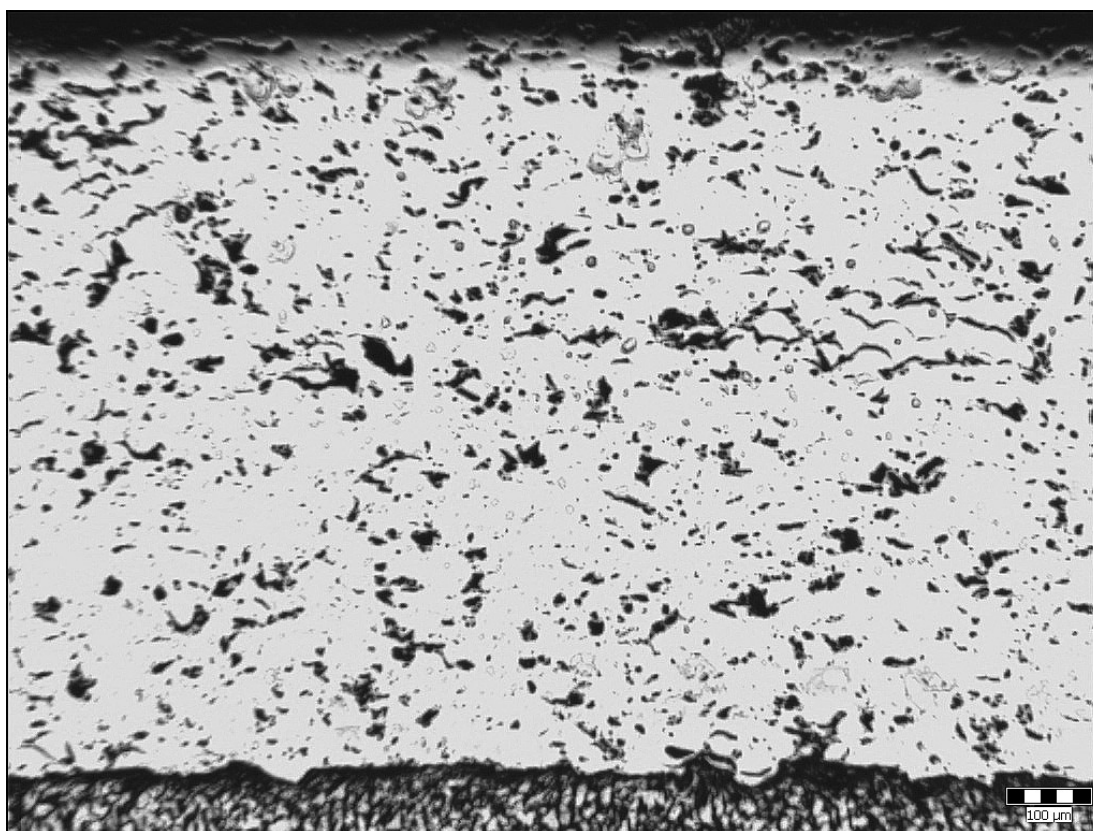
Obr. 5.5 Vzorky upnuté v držáku

V předposlední fázi přípravy proběhlo leštění v zařízení Struers tegra force 5 po dobu 10 minut. Vzorky se leštily kvůli dosažení kvalitní hladké a lesklé plochy. Poslední část přípravy vzorků spočívala v naleptání. Leptání se provádí z důvodu, aby při focení mikrostruktury byla vidět struktura zkoumaného materiálu. Při leptání se postupovalo podle knihy [39].

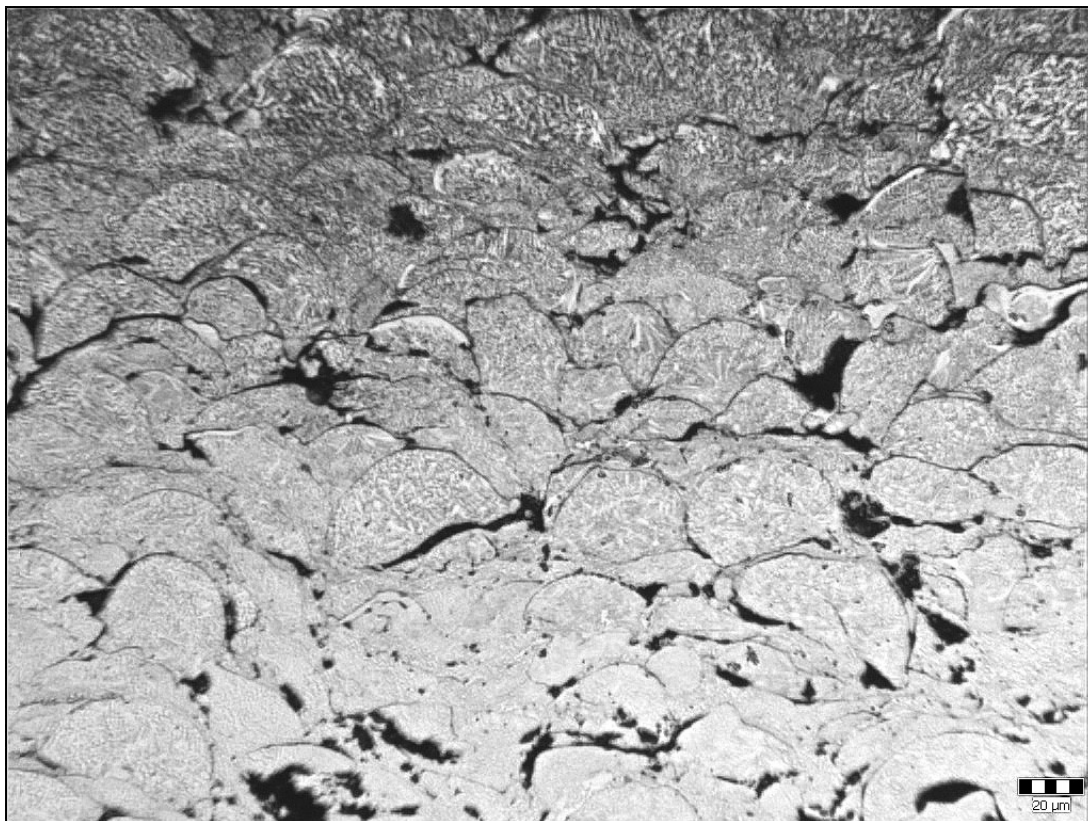
#### 6.4 Vyhodnocení mikrostruktury

Na obrazech mikrostruktury u vzorků 1 – 3 jsou vidět oxidy, póry a vměstky (černé skvrny) při zvětšení 50x. Při zvětšení 200x jsou vidět u vzorků 1 – 3 kapky. Přičemž mikrostruktura u Stellite 6 je na všech 3 vzorcích podobná a tudíž nedošlo při nástřiku k difundování Stellite 6 do základního materiálu. Na obrazech se neobjevily žádné trhlinky.

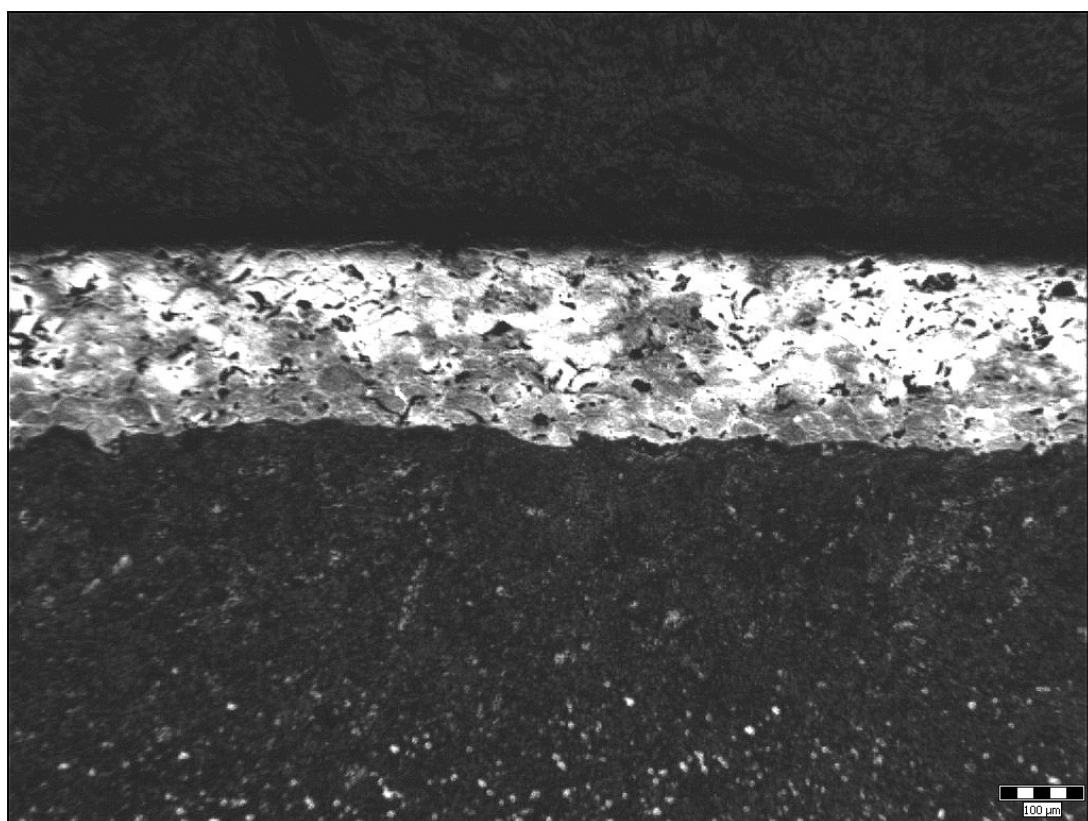
Vzorky 4 – 6 při zvětšení x100 lze vidět jednotlivé kapky nástřiku. Při zvětšení x200 jdou vidět oxidy, póry a vměstky. V porovnávání se Stelitem 6 Stellite 21 vykazuje v mikrostruktuře menší obsah póru, oxidu a vměstků. U Stellite 21 na všech vzorcích se vyskytuje stejná mikrostruktura a z toho vyplývá, že nedošlo při nástřiku k difundování Stellite 21 do základního materiálu. Na obr. 5.16 a 5.17 jde vidět prohlubeň, do které nástřik nezatekl v průběhu procesu stříkání. Na jednotlivých obrazech mikrostruktury se neobjevily trhliny.



Obr. 5.6 Vzorek č. 1 zvětšení x50

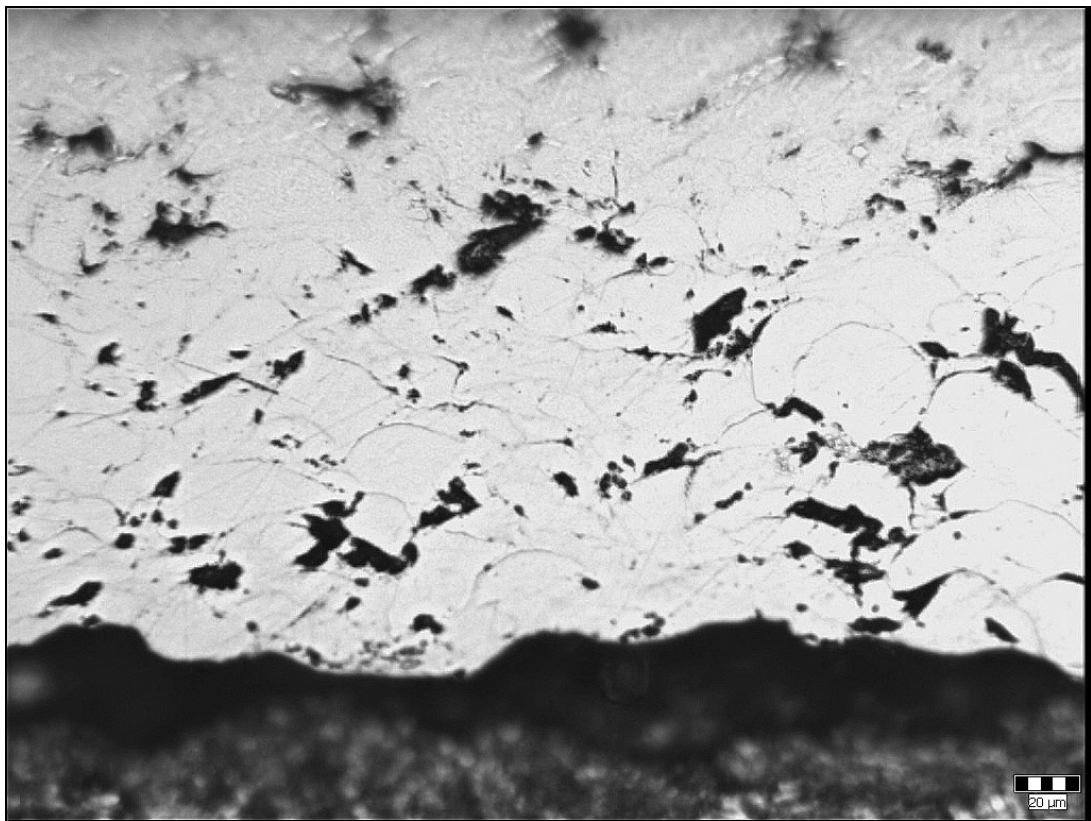


Obr 5.7 Vzorek č. 1 zvětšení x200

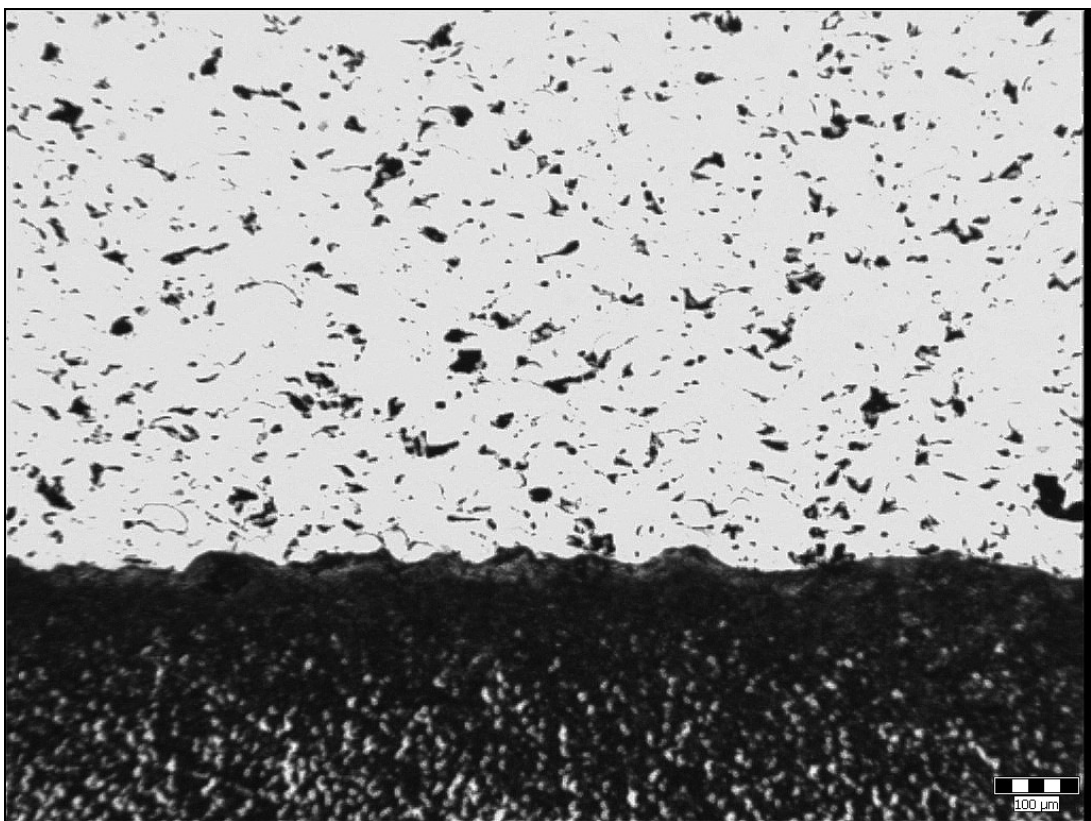


Obr. 5.8 Vzorek č. 2 zvětšení x50

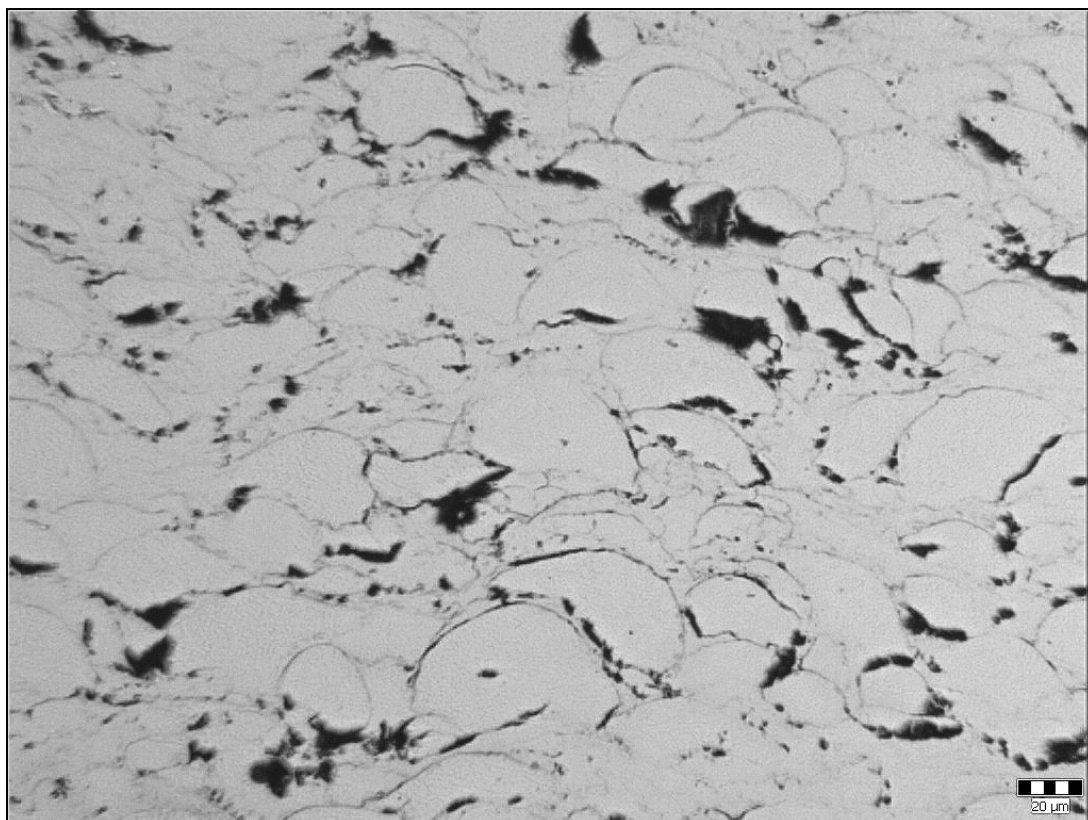




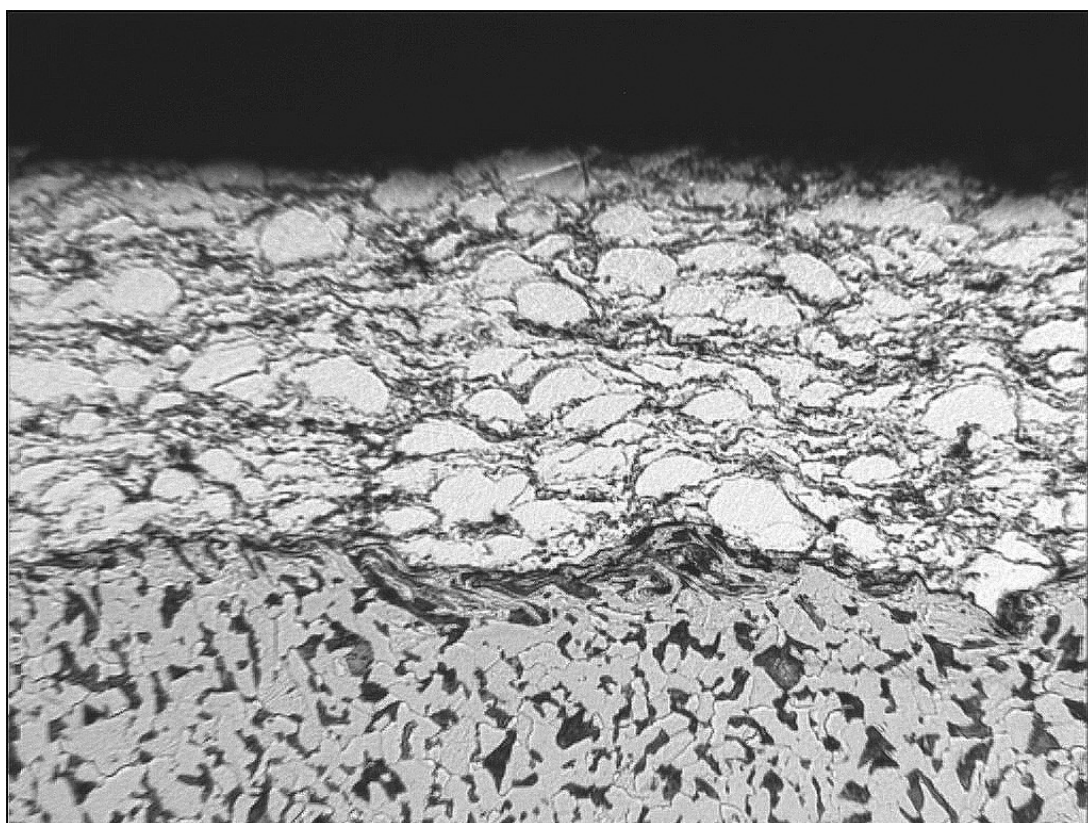
Obr. 5.9 Vzorek č. 2 zvětšení x200



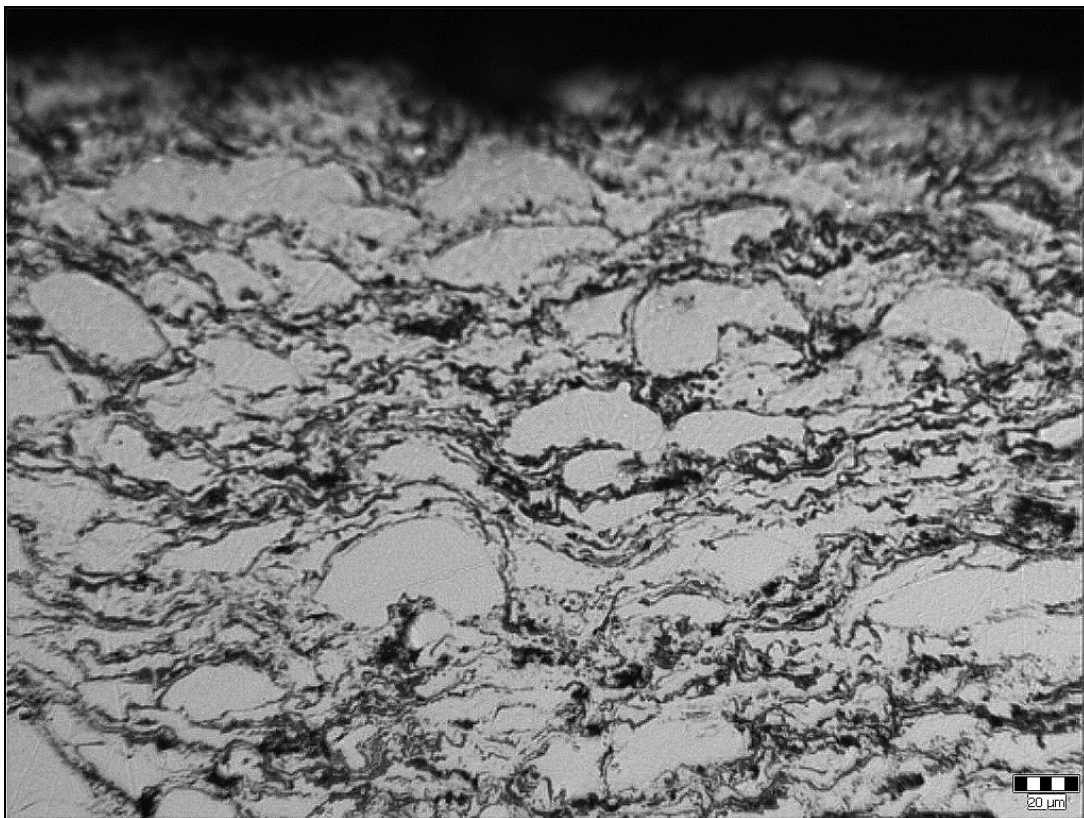
Obr. 5.10 Vzorek č. 3 zvětšení x50



Obr. 5.11 Vzorek č. 3 zvětšení x200



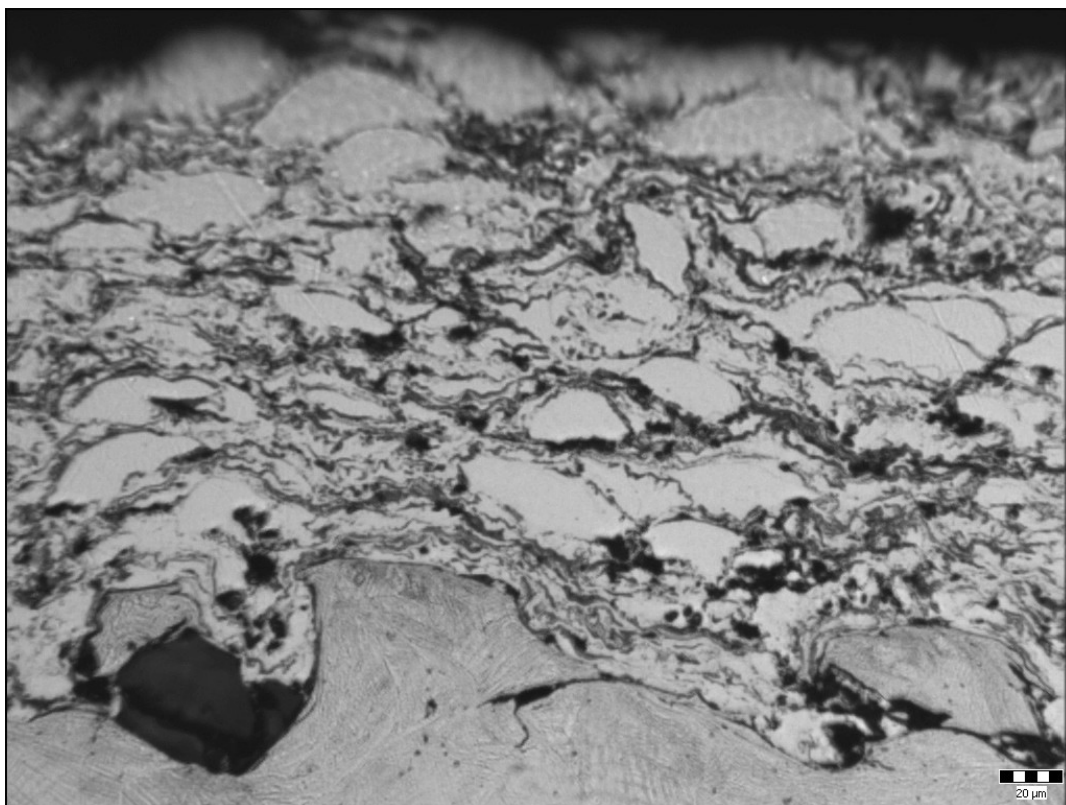
Obr. 5.12 Vzorek č. 4 zvětšení x100



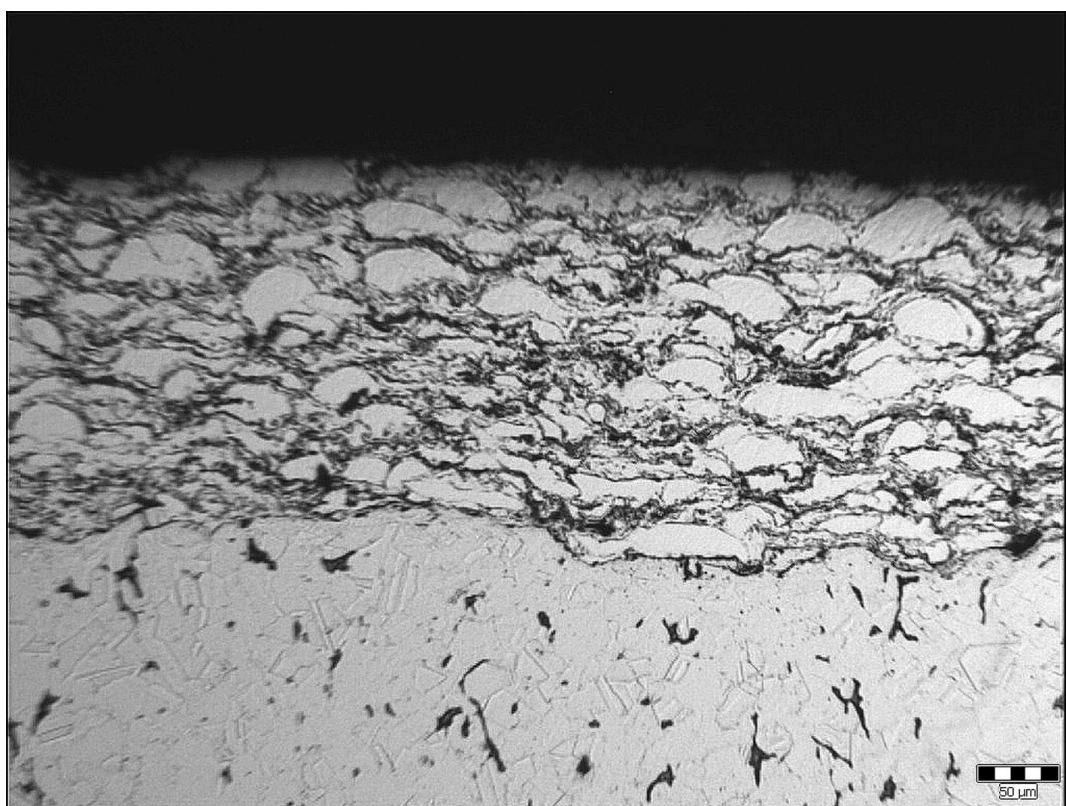
Obr. 5.13 Vzorek č. 4 zvětšení x200



Obr. 5.14 Vzorek č. 5 zvětšení x100

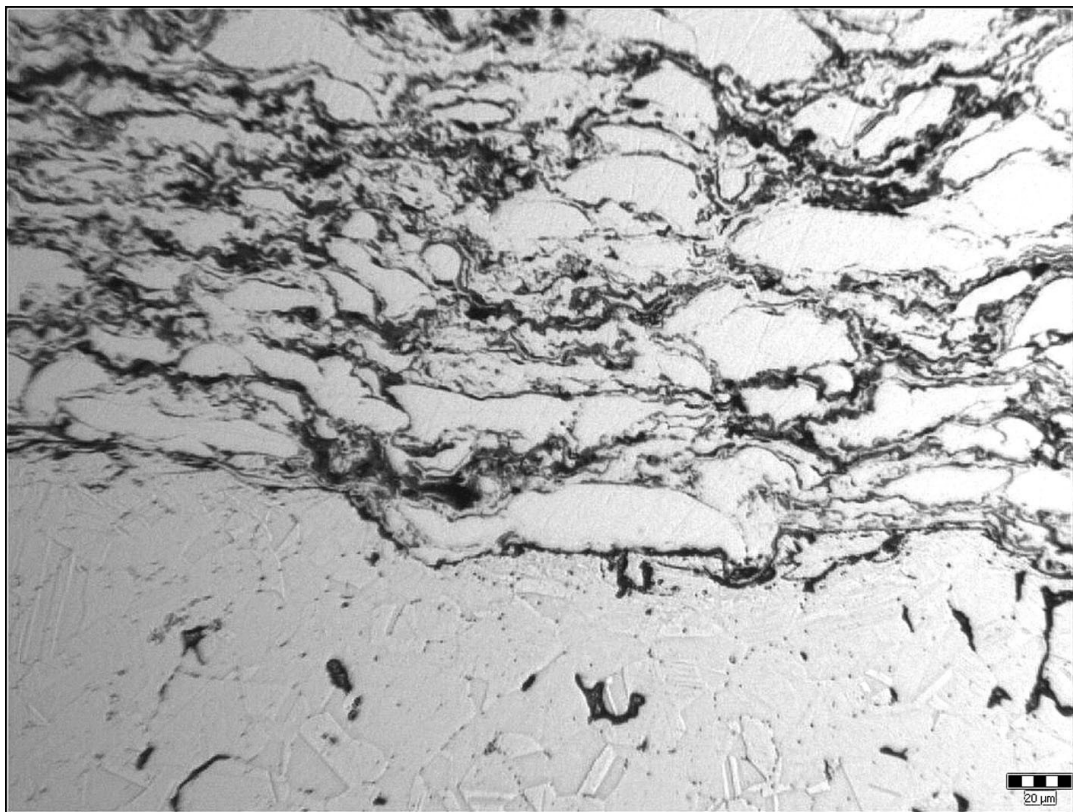


Obr. 5.15 Vzorek č. 5 zvětšení x200



Obr. 5.16 Vzorek č. 6 zvětšení x100

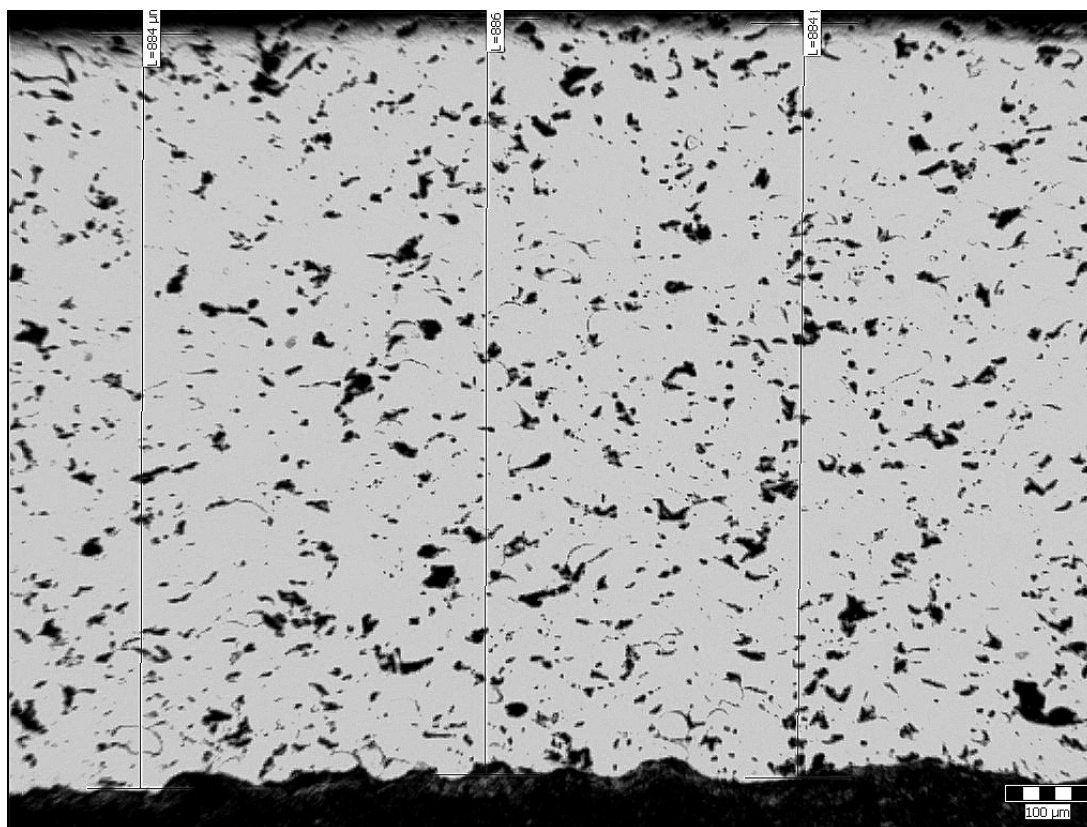




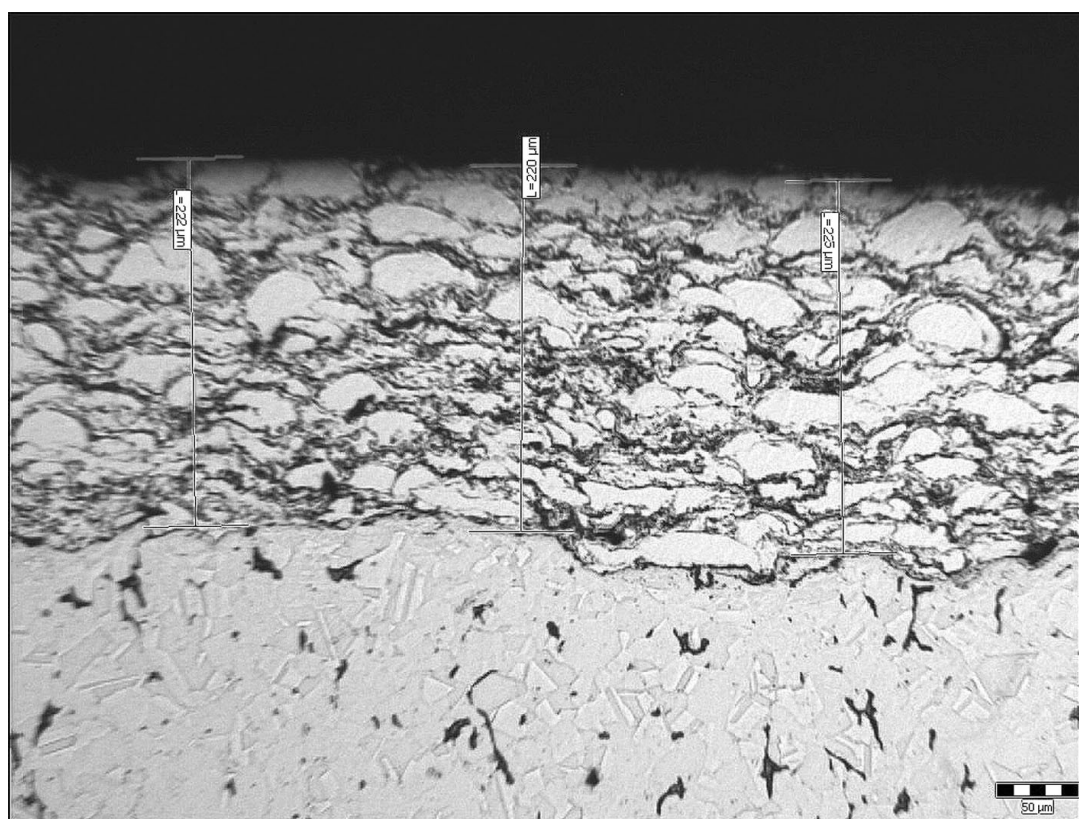
Obr. 5.17 Vzorek č. 6 zvětšení x200

### 6.5 Měření tloušťky nástriku

Pro měření tloušťky se využilo připravených vzorků pro vyhodnocení mikrostruktury a tloušťka se měřila pomocí světelné mikroskopie, s použitím Olympus GX51 za podpory programu QuickPhoto industrial 2.2, v místě řezu (obr. 5.17, obr 5.18). Měření tloušťky v místě řezu pomocí světelné mikroskopie je považována za velice přesnou metodu. Tloušťka se měřila ve 3 různých místech v řezu.



Obr. 5.17 Vzorek č. 3 měření tloušťky nástřiku zvětšení x50



Obr. 5.18 Vzorek č. 6 měření tloušťky nástřiku zvětšení x100

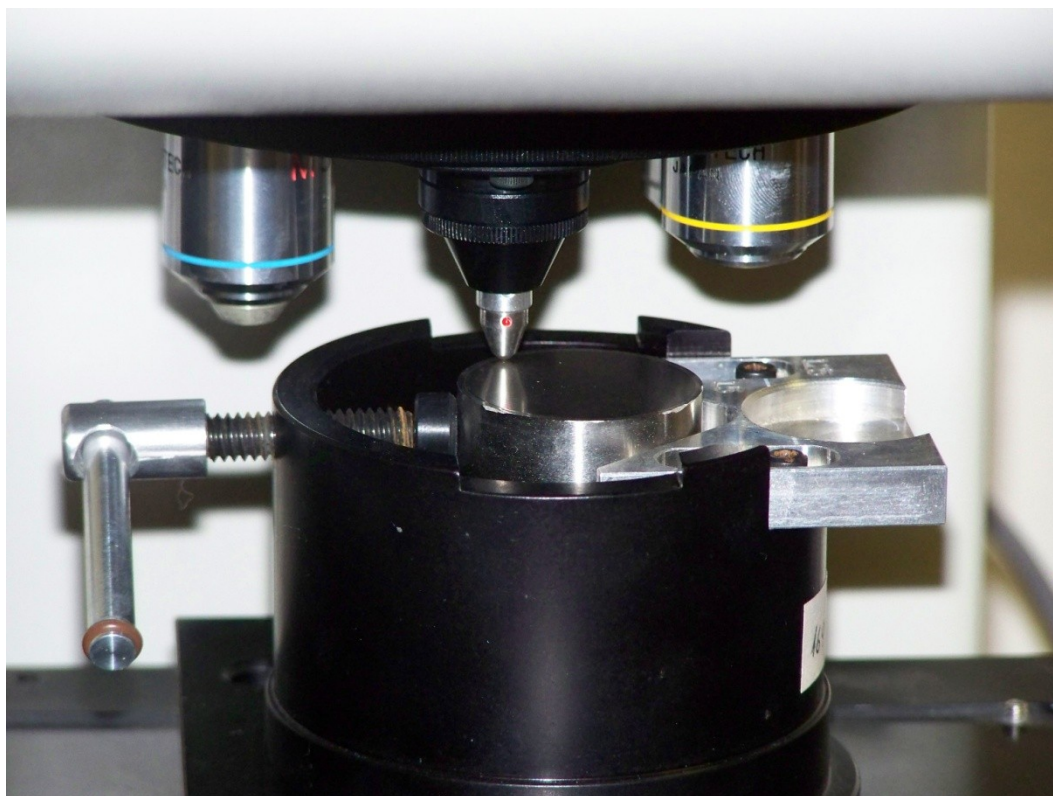
Tab. 17 Změřená tloušťka nástřiku

Vzorek č.	Tloušťka nástřiku ( $\mu\text{m}$ )	Měřeno při zvětšení
1.	852	x50
2.	218	x50
3.	884,7	x50
4.	235,3	x100
5.	184	x100
6.	222,3	x100

Hodnoty uvedené v (tab. 6) jsou aritmetické průměry jednotlivých naměřených hodnot. Rozdílné zvětšení bylo použito z důvodu, že u vzorků 1, 2 a 3 při zvětšení x100 se oblast měření nevešla do okuláru.

## 6.6 Měření tvrdosti

Měření mikro a makro tvrdosti bylo provedeno podle Vickerse. Měření tvrdosti podle Vickerse je založené na zatlačování diamantového jehlanu do zkoumaného materiálu. Mikrotvrdost se měřila na přístroji Leco microhardness Tester CM 247 AT při podpoře programem Amb 43 – 1.50. Mikrotvrdost se měřila v řezu zkoumaných vzorků (obr. 5.7) při zatížení 100 gramů po dobu 13 sekund. Makrotvrdost byla změřena na povrchu vzorku Vickersovým tvrdoměrem při zatížení 5 kg.



Obr. 5.7 Vzorek č. 1 při měření mikrotvrlosti

Tab. 18 Naměřená mikro a makro tvrdost

Vzorek č.	HV 0,1	HV 5
1	594,5	534,6
2	515,7	546,2
3	519,3	537,4
4	478,7	447,4
5	483,3	438,6
6	482,7	445,4



## 6.7 Diskuse dosažených výsledků

Na vzorcích, kde byl nastříkaný Stellite 6, byla největší mikrotvrдость HV 0,1 naměřena 594,5. Tato hodnota byla změřena u vzorků číslo 1. Změřená mikrotvrдость HV 0,1 se pohybovala od 515,7 až k zmiňovaným 594,5. Makrotvrдость HV 5 se pohybovala od 537,4 až do 546,2. Největší makrotvrдость byla dosažena u vzorku číslo 2. Z toho vyplývá, že základní materiál nemá vliv na výslednou tvrdost povlaku. Výrobce Deloro Stellite uvádí, že tvrdost Stellite 6 je 410 HV. Z toho plyne, že při použití nástřiku metodou HVOF na zařízení TAFA JP 5 000 je tvrdost výsledného povlaku vyšší než uvádí výrobce. Při hodnocení mikrostruktury jde vidět, že ani u jediného vzorku nevznikly trhliny ve Stellite 6. Na snímcích se objevily póry, oxidy a vměstky. Mikrostruktura u všech tří vzorků je podobná z toho vyplývá, že na výslednou mikrostrukturu nemá vliv základní materiál. Vyfotografovaná mikrostruktura v porovnání s mikrostrukturou, kterou uvádí výrobce (obr. 4.2), je podobná.

Při zkoumání vzorků se Stellite 21 byla změřená mikrotvrдость HV 0,1 v rozmezí od 478,7 až do 483,3. Nejvyšší mikrotvrдость byla změřena u vzorků číslo 5. Makrotvrдость HV 5 se pohybuje od 438,6 až k 447,4. Nejvyšší makrotvrdst HV 5 byla změřena u vzorku číslo 4. Ze změřených tvrdostí vyplývá, že na výslednou tvrdost nemá vliv základní materiál. Výrobce u Stellite 21 udává tvrdost HV 347. Tím bylo potvrzeno, že při nástřiku metodou HVOF na zařízení TAFA JP 5 000 dochází k mírnému zvýšení tvrdosti povlaku. Při šetření mikrostruktury nebyly nalezeny žádné trhlinky v povlaku. Na snímcích (obr. 5.16 a obr. 5.15) lze vidět malou prohlubeň mezi povlakem a základním materiálem. Do této prohlubně nástřik neproniknul. Mikrostruktura Stellite 21 na všech vzorcích je podobná z toho vyplývá, že nedošlo k difundování nástřiku do základního materiálu během procesu stříkání. Výsledné mikrostruktury se podobají mikrostruktuře, kterou uvádí výrobce na svých stránkách (obr. 4.5).

## 7 Závěr

Předložená bakalářská práce se zabývá problematikou žárových nástřiků především metodou HVOF. V teoretické části je popsán princip technologie žárového nástřiku. Uvedené rozdělení podle normy ČSN EN 657 038700. Převážná část teoretické části byla věnována vysokorychlostnímu nástřiku HVOF. Metoda HVOF vyniká vysokou hustotou nástřiku, nízkou pórovitostí a obsahem oxidů. Umožňuje nanášení cermentů, čistých kovů a jejich slitin. Teplota plamene se pohybuje kolem 2 600 °C a rychlost částic dosahuje až 1000 m/s. Nízká teplota plamene neumožňuje nanášet keramické povlaky.

Pro doplnění jsou v kapitole 3 stručně popsány ostatní používané metody žárových nástřiků (nástřik plamenem, detonační nástřik, plazmatický nástřik, nástřik elektrickým obloukem) a uvedeno srovnání jednotlivých základních parametrů. Žárové nástřiky se neustále vyvíjí a objevují se nové možnosti aplikace. Mezi nejnovější metodu patří v současnosti vysokorychlostní nástřik za studena.

V kapitole 5 věnované přídavných práškům na bázi kobaltu jsou popsány prášky Stellite 6 a Stellite 21 od výrobce Deloro Stellite. Stellite 6 se vyznačuje odolností proti korozi, nízkým koeficientem tření a odolává oxidaci kyselin. Nejčastěji se používá v chemickém a energetickém průmyslu na ventily a lopatky turbín. Hlavní charakteristické rysy Stellite 21 je odolnost proti kavitaci, abrazi a odolává mechanickému a teplotnímu šoku. Výrobce Deloro Stellite vyrábí celou řadu prášku typu Stellite. Každý prášek má specifické vlastnosti a použití.

Cílem bakalářské práce bylo ověření užitečných vlastností přídavných materiálů Stellite 6 a Stellite 21. V České republice se jednalo o jednu z prvních aplikací zkoumaných přídavných materiálů ve formě prášku nanášených metodou HVOF. V rámci experimentální práce bylo provedeno měření mikro a makro tvrdosti, vyhodnocení mikrostruktury a měření tloušťky povlaku. Při měření mikrotvrdosti se postupovalo podle normy ČSN EN ISO 4516. V porovnání s údajem tvrdosti od výrobce naměřená tvrdost byla vyšší. Tím bylo potvrzeno, že při nástřiku metodou HVOF povlaky dosahují vyšší tvrdosti oproti klasickým způsobům nanášení povlaku. Dosahovaná vyšší tvrdost při nástřiku metodou HVOF je přínosem pro průmysl.

Při hodnocení mikrostruktury bylo zjištěno, že nastříkaný povlak nedifunduje do základního materiálu. U zkoumaných vzorků nebyly v nastříkané vrstvě zjištěné trhlinky, pouze se objevily póry, oxidy a vměstky. Byly ověřeny vhodné podmínky nástřiku. Při

experimentu nebyly zjištěné žádné vady v nanesených zkoumaných materiálech. Výsledky experimentu odpovídají s dostupnými prameny a tudíž jejich aplikaci je doporučena. V případě konkrétní aplikace by bylo vhodné práci rozšířit o další zkoušky. Například o zkoušky přilnavosti, odolnosti proti korozi, které nebyly prováděny s ohledem na rozsah bakalářské práce.

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Vladislavovi Ochodkovi za jeho ochotu a odbornou pomoc při psaní předložené bakalářské práce. Dále děkuji paní Ing. Xénii Ševčíkové a paní Jarmile Čapkové za pomoc při přípravě vzorků a realizaci experimentální práce.

## 8 Seznam použité literatury

- [1] ENŽL, Radek, Olga BLÁHOVÁ a Šárka HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ. Žárové nástřiky: Původ a historie žárových nástřiků. [online]. [cit. 2011-10-12]. Dostupné z: <http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/3.html> >
- [2] ENŽL, Radek, Olga BLÁHOVÁ a Šárka HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ. Žárové nástřiky: Princip vytváření žárových nástřiků. [online]. [cit. 2011-10-14]. Dostupné z: <http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/4.html>>
- [3] THERMAL SPRAYING. [online]. [cit. 2011-10-17]. Dostupné z: <http://www.tcpg.fr/html/thermalspraying2009.html>>
- [4] ENŽL, Radek, BLÁHOVÁ a Šárka HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ. Žárové nástřiky: Nástřík plamenem. [online]. [cit. 2011-10-17]. Dostupné z: [http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/8\\_1.html](http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/8_1.html)>
- [5] ENŽL, Radek, Olga BLÁHOVÁ a Šárka HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ. Žárové nástřiky: Detonační nástřík. [online]. [cit. 2011-10-22]. Dostupné z: [http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/8\\_2.html](http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/8_2.html)>
- [6] ENŽL, Radek, Olga BLÁHOVÁ a Šárka HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ. Žárové nástřiky: Plazmatický nástřík. [online]. [cit. 2011-10-22]. Dostupné z: [http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/8\\_4.html](http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/8_4.html)>
- [7] Servis armatur: Nástřík elektrickým obloukem. [online]. [cit. 2011-11-02]. Dostupné z: <http://www.servisarmatur.cz/?c=nastrik-obloukem>>
- [8] ENŽL, Radek, Olga BLÁHOVÁ a Šárka HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ. Žárové nástřiky: Vysokorychlostní nástřík plamenem HVOF. [online]. [cit. 2011-11-10]. Dostupné z:< [http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/8\\_3.html](http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/8_3.html)>
- [9] Cold gas service GmbH: PROCESS · About Cold Gas Spraying. [online]. [cit. 2011-11-26]. Dostupné z:< <http://www.cgt-gmbh.com/cgs/>>
- [10] ČSN EN 657 (038700). *Žárové stříkání: Názvosloví, klasifikace*. Český normalizační institut. 01/2005

- [11] HVOF SPRAYING. [online]. [cit. 2011-11-28]. Dostupné z: <http://www.tcpp.fr/html/hvofspraying2009.html>
- [12] Servis armatur: Vysokorychlostní nástřik HVOF. [online]. [cit. 2011-11-26]. Dostupné z: <http://www.servisarmatur.cz/?c=nastrik-hvof>
- [13] HVOF. [online]. [cit. 2011-12-05]. Dostupné z: <http://www.gordonengland.co.uk/hvof.htm>
- [14] TAN, J.C.; LOONEY, L.; HASHMI, M.S.J. Component repair using HVOF thermal spraying. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999, 92-93, s. 1
- [15] ANDREAS WANK, Bernhard Wielage, et al. Development and trends in HVOF spraying technology. *Institute of Composite Materials*. 2006, 5, s. 1-6
- [16] MBe International Thermal Spray Services [online]. [cit. 2011-12-15]. MBe International - What is Thermal Spraying?. Dostupné z: <http://www.mbe-international.com/index.html>
- [17] Deloro Stellite: HVOF and Thermal Spray Powders. [online]. [cit. 2011-12-26]. Dostupné z: <http://stellite.com/ProductsServices/HardfacingAlloys/Powder/HVOFandThermalSprayPowders/tabid/302/Default.aspx>
- [18] ENŽL, Radek, Olga BLÁHOVÁ a Šárka HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ. Žárové nástřiky: Ukázky aplikací žárových nástřiků. [online]. [cit. 2011-12-22]. Dostupné z: <http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/12.html>
- [19] Deloto Stellite: Alloy Database. [online]. [cit. 2012-01-20]. Dostupné z: <http://www.stellite.com/Technical/AlloyDatabase/tabid/262/Default.aspx>
- [20] Stellite® 6 alloy: Technical data. [online]. [cit. 2012-01-20]. Dostupné z: <http://www.stellite.co.uk/Portals/0/Stellite%206%20Final.pdf>
- [21] STELLITE Alloy 6. [online]. [cit. 2012-01-20]. Dostupné z: <http://www.adorfon.com/products/fma/pdfs/stellite6.pdf>

- [22] Stellite 6 alloy. [online]. [cit. 2012-01-29]. Dostupné z: <http://www.stellite.co.uk/Portals/0/Properties%20of%20Stellite%20in%20different%20forms.pdf>
- [23] Romo SA, et al. Cavitation and high-velocity slurry erosion resistance of welded Stellite 6 alloy. *Tribology International* (2011), doi:10.1016/j.triboint.2011.10.003
- [24] SIDHU, T.S., S. PRAKASH a AGRAWAL. Hot corrosion studies of HVOF NiCrBSi and Stellite-6 coatings on a Ni-based superalloy in an actual industrial environment of a coal fired boiler. *Metallurgical and Materials Engineering Department, Indian Institute of Technology Roorkee*. 2006, s. 1-11
- [25] Singh Sidhu, Hazoor; Singh Sidhu, Buta; Prakash, S. Solid particle erosion of HVOF sprayed NiCr and Stellite-6 coatings. 2007, 5, s. 1-7
- [26] Sidhu, T. S.; Prakash, S.; Agrawal; R. D. A comparative study of hot corrosion resistance of HVOF sprayed NiCrBSi and Stellite-6 coated Ni-based superalloy at 900 °C. *Metallurgical & Materials Engineering Department, Indian Institute of Technology Roorkee*. 2006, s. 1-9
- [27] Sidhu, T. S.; Prakash, S.; Agrawal; R. D. Studies of the metallurgical and mechanical properties of high velocity oxy-fuel sprayed stellite-6 coatings on Ni- and Fe-based superalloys. *Metallurgical & Materials Engineering Department, Indian Institute of Technology Roorkee*. 2006, 1. s. 1-9.
- [28] Alloy Database: Composition. *Deloro Stellite* [online]. [cit. 2012-02-12]. Dostupné z: <http://www.stellite.com/Technical/AlloyDatabase/tabid/262/Default.aspx>
- [29] Stellite 6 alloy: Comparison of the properties of stellite 6 alloy when supplied in different product forms. [online]. [cit. 2012-02-13]. Dostupné z: <http://www.stellite.co.uk/Portals/0/Properties%20of%20Stellite%20in%20different%20forms.pdf>
- [30] STELLITE® 21 ALLOY: TECHNICAL DATA. [online]. [cit. 2012-02-19]. Dostupné z: <>
- [31] Radu, I.; Li, D.Y.; Llewellyn, R. Tribological behavior of Stellite 21 modified with yttrium. *Department of Chemical and Materials Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada T6G 2G6; Institute for Fuel Cell Innovation, National Research Council, Vancouver, British Columbia, Canada V6T 1W5*. 2004, 3. s. 1-13.

- [32] Kashani, H.; Amadeh, A.; Ohadizadeh, A. Effect of temperature on the strain induced  $\gamma \rightarrow \gamma'$  phase transformation in Stellite 21 during wear test. *School of Metallurgy and Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, P.O. Box 11365-4563, Tehran, Iran. 2006, 7. s. 1-4.*
- [33] ČSN 41 1523 (411523). ČSN 41 1523. 1994.
- [34] ČSN 41 7116 (417116). ČSN 41 7116. 1979.
- [35] ČSN 41 7255 (417255). ČSN 41 7255. 1990.
- [36] ČSN 41 7246 (417246). ČSN 41 7246. 1990.
- [37] OLSON, D.L., T.A. SIEWERT, S. LIU a G.R. EDWARDS. *ASM Handbook Volume 06: Welding, Brazing and Soldering*. ASM International, 1993. ISBN 978-0-87170-382-8.
- [38] PÍŠEK, František. *Nauka o materiálu II./2: Kovové povlaky: Receptář pro elektrolytické leštění a pro elektrolytické a chemické leptání*. Praha: Československá akademie věd, 1959, s. 453-507. ISBN 17389.
- [39] GLYNN, Tom. DELORO STELLITE. *Plasma Transferred Arc and HVOF*. 2007
- [40] TAN, J.C., L. LOONEY a HASHM. Component repair using HVOF thermal spraying. *Materials Processing Research Centre, Dublin City University, Dublin 9, Ireland*, 1999. 1 – 6 s.



## **9 Seznam příloh**

**Příloha 1:** Chemická analýza Stellite 6

**Příloha 2:** Chemická analýza Stellite 21

**Příloha 3:** Parametry stříkání

# Příloha 1

## Certificate of Analysis

Date:	Our Order	Shipping Order	
Product Name:	Item Number	Lot Number:	Quantity UM
Co-106-8/1256F	032162-10	14	
Praxair Specification: PS 032162		Customer PO #:	

### Chemistry

<u>Element</u>	<u>Min.</u>	<u>Max.</u>	<u>Result</u>	<u>OK</u>
Cobalt	<i>Balance</i>		Balance	Yes
Chromium	26.5	29.5	27.5	Yes
Carbon (total)	0.9	1.4	1.1	Yes
Iron		3.0	0.6	Yes
Manganese		1.00	0.004	Yes
Molybdenum		1.00	0.001	Yes
Nickel		3.0	0.2	Yes
Silicon	0.5	1.5	1.2	Yes
Total All Others		0.50	< 0.10	Yes
Tungsten	3.0	5.0	4.1	Yes

### Sieve Analysis - ASTM B214

<u>Sieve</u>	<u>Min.</u>	<u>Max.</u>	<u>Result</u>	<u>OK</u>
+200		0	0	Yes
+230		2	0	Yes
+270		5	1	Yes

### Microtrac

<u>Micron Channel</u>	<u>Min.</u>	<u>Max.</u>	<u>Result</u>	<u>OK</u>
-22		5	5	Yes
-16		2	2	Yes
-11		1	1	Yes

Comments: Praxair Surface Tech Vendor #90506  
NSL Analytical Service Vendor

Authorized Signature:

*Spec ranges shown above in Italics are target or nominal specifications only*

\* indicates test is not required for routine acceptance.

PST: 37509

This report is confidential and proprietary, and intended for the recipient of the product. If you receive this report in error you are prohibited from disclosing, copying, distributing, or using any of this information. Please contact our office for instructions. The recording of false, fictitious, fraudulent statements or entries on the certificate may be punished as a felony under federal law.

## Příloha 2

### Certificate of Analysis

(Inspection Certificate DIN EN 10204:2005-3.1)

Product Name: CO-538  
Praxair Spec: PS ZCO538-00BK  
Item Number: ZCO538-0010  
Lot Number: 4

Our Order:

Order:

Customer:

Quantity: lbs

Date:

All elements measured in weight percent unless otherwise specified. Sampling Method per ASTM B215.

#### Chemistry

Element	Test Method	Test Lab	Min.	Max.	Result	OK
Aluminum	ICPMS	NSL		0.10	< 0.001	Yes
Boron	ICPMS	NSL		0.010	< 0.001	Yes
Cobalt						
Chromium						
Carbon (total)	ICP	NSL	26.50	30.00	Balance 28.23	Yes
Iron				0.25	0.00291	Yes
Manganese	ICPMS	NSL		1.0	0.2	Yes
Molybdenum	ICPMS	NSL		1.0	< 0.001	Yes
Nitrogen	ICP	NSL	4.5	7.0	5.8	Yes
Nickel	Leco	Praxair		0.25	0.01	Yes
Oxygen	ICPMS	NSL		1.0	0.1	Yes
Phosphorus	Leco	Praxair		0.05	0.05	Yes
Sulfur	ICPMS	NSL		0.020	< 0.005	Yes
Silicon	Leco	Praxair		0.010	0.002	Yes
Titanium	ICPMS	NSL		1.0	0.1	Yes
Tungsten	ICPMS	NSL		0.10	0.001	Yes
	ICPMS	NSL		0.20	0.01	Yes

#### Sieve Analysis - ASTM B214

Sieve	Min.	Max.	Result	OK
+325		1	0	Yes

#### Microtrac

Micron Channel	Min.	Max.	Result	OK
-11				
-5.5		Report 10	15.98	Yes
			2	Yes

Comments: NSL ANALYTICAL SERVICES VENDOR#-T5375  
PRAXAIR SURFACE TECH VENDOR #90506

(Quality Assurance / Qualitätssicherung)

#### Statement of

Praxair Surface Technologies certifies that processing, product testing, and inspection control of raw material and formulating procedures are in conformance with all applicable specifications, drawings, and/or standards. Complete test reports as required are on file. Powders do not have a shelf life & the expiration date of slurries is listed in the header above.

Distributed for and on behalf of Praxair Surface Technologies, Inc., 1555 Main Street, Indianapolis, IN 46224, USA  
Estimated uncertainty of measurement is available upon request.

PST: 112406

*Spec ranges shown above in Italics are target or nominal specifications only.*

\* indicates test is not required for routine

Materials Testing Laboratory

This report is confidential and proprietary, and intended for the recipient of the product. If you receive in error you are prohibited from disclosing, copying, distributing, or using any of the information. The test report shall not be reproduced except in full, without the written approval of the laboratory. Please contact our office for instructions. The recording of false, fictitious, fraudulent statements or entries on the certificate may be punished as a felony under federal law. All elements measured in percent unless otherwise specified.

# Technical Data

## Bulletin



Praxair Surface Technologies  
1555 Main Street  
Indianapolis, IN 46224



Praxair Surface Technologies  
TAFE Incorporated  
146 Pembroke Road  
Concord, NH 03301

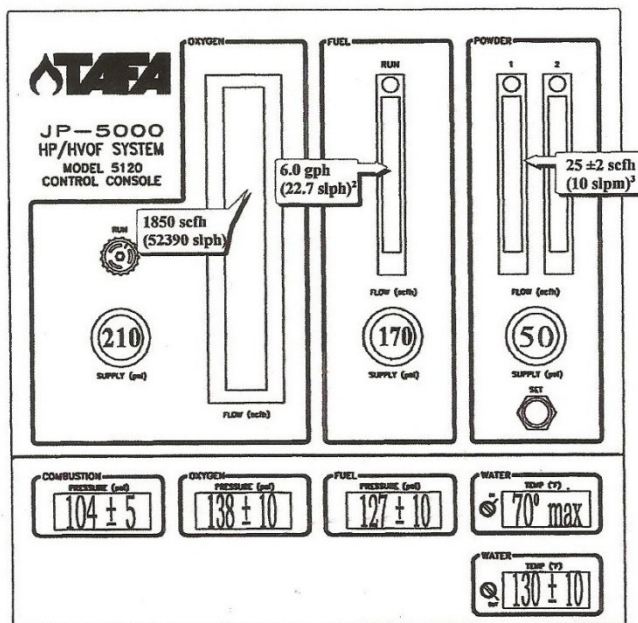
File: 1.9.2.2SH-1265F  
Issue: M10520  
Original Issue

### SPRAY PARAMETERS

1265F Super alloy 625

Although spray parameters vary, the following settings are recommended as good starting points for this coating. Some modification may further enhance the coating quality.

Spray System:	JP-5000 HP/HVOF	Spray Rate:	13 lb/hr (98 g/min)
Gun Barrel:	6" Length	Feeder Speed:	370 rpm (6 Pitch Screw)
Spray Distance:	15" (380 mm)	Coating Thickness:	0.100" [.254 cm]



1. **Oxygen Flow** - The above flow setting is based on 210 psi supply pressure. For different supply pressures, use the Pressure Correction Chart in the Operation Section of the Manual to determine the correct flow for scfh specified above.
2. **Fuel Flow** - Users of older control consoles with a 0 to 100% tube in the fuel flowmeter should consult TAFE for the correct settings.
3. **Carrier Flow** - The needle valve above the powder feeder flowmeter should be left wide open and the flow should be adjusted with the needle valve on the console flowmeter. All flow rates are for nitrogen.

Copyright © 1997 TAFE Incorporated, Concord, NH - USA. All rights reserved.